



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Energieffektiv fartpilot

Kjems, Erik; Bolet, Lars; Plausinaitis, Darius; Staunstrup, Jan K.

Publication date:
2013

Document Version
Tidlig version også kaldet pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Kjems, E., Bolet, L., Plausinaitis, D., & Staunstrup, J. K. (2013). *Energieffektiv fartpilot*. Institut for Planlægning, Aalborg Universitet. ISP-Skriftserie Nr. 02

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



AALBORG UNIVERSITET

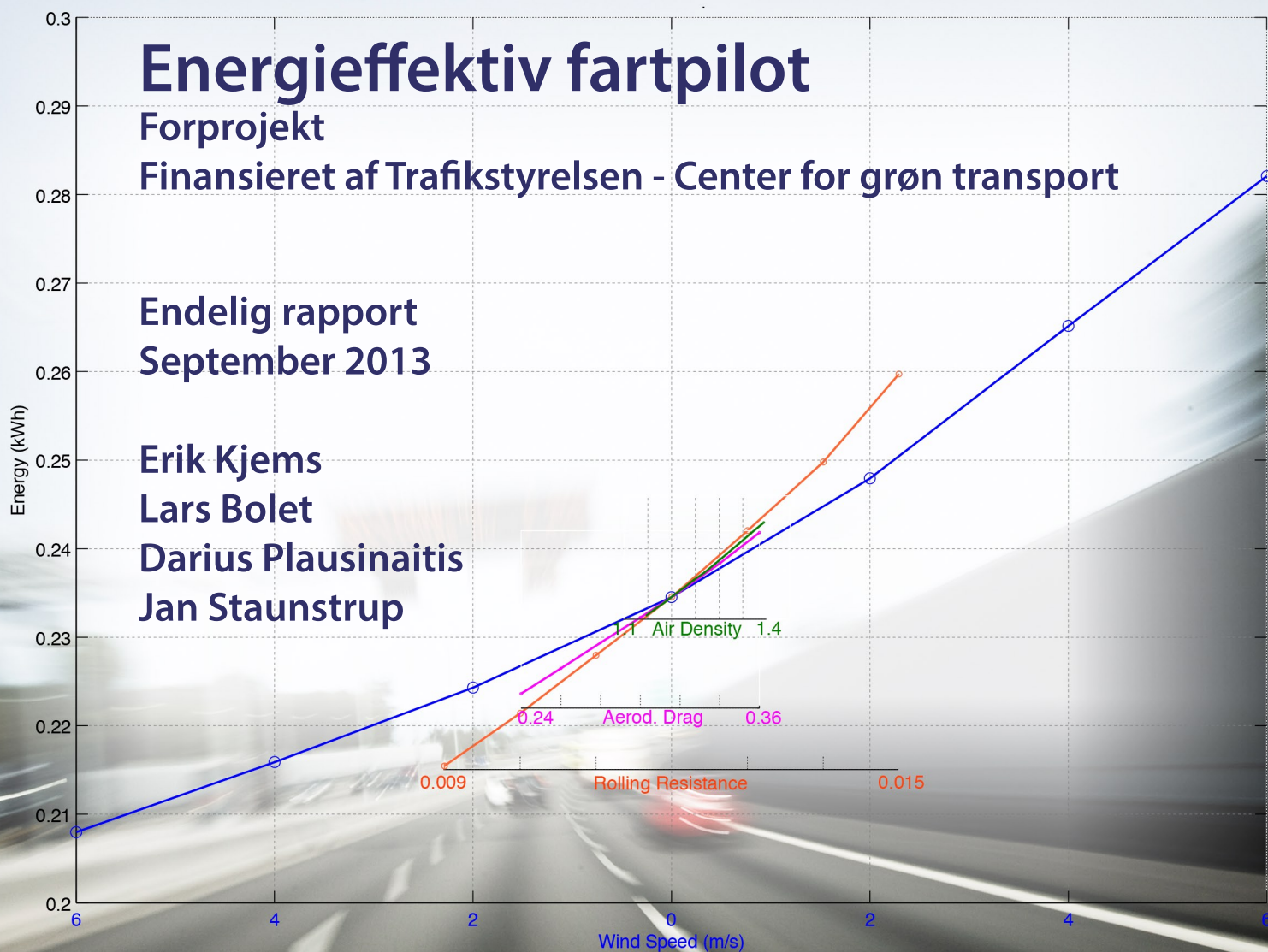
Energieeffektiv fartpilot

Forprojekt

Finansieret af Trafikstyrelsen - Center for grøn transport

Endelig rapport
September 2013

Erik Kjems
Lars Bolet
Darius Plausinaitis
Jan Staunstrup





AALBORG UNIVERSITET

Energieffektiv fartpilot
Indledende forskningsprojekt ved Aalborg Universitet i perioden 2012-2013

© Aalborg Universitet, Erik Kjems, Lars Bolet, Darius Plausinaitis, Jan Staunstrup
Publication series 2013-02
ISSN 1397-3169-pdf

Institut for Planlægning
Trafikforskningsgruppen
Aalborg Universitet
Vestre Havnepromenade 5
9000 Aalborg



1 Indholdsfortegnelse

1	Indholdsfortegnelse	3
2	Baggrund	5
3	Resumé	7
4	Indledning	9
5	Det kørselsdynamiske modul	13
5.1	Generelle forudsætninger	14
5.1.1	Hastighedsændrende kraftpåvirkninger	14
5.2	De optrædende kraftpåvirkninger	15
5.2.1	Vejens normalreaktionskræfter, F_N	15
5.2.2	Tyngdekraften, F_G	16
5.2.3	Centripetal- og centrifugalkræfter, F_C	17
5.2.4	Rullemodstand, F_R	18
5.2.5	Vindkræfter og luftmodstand, F_L	20
5.2.6	Trækkraften, F_T	22
5.2.7	Friktionskræfter, F_F	23
5.2.8	Den resulterende kraft, F_{RES}	24
5.3	Den opstillede Simulink®-model	25
5.3.1	Test af Simulink modellen	25
5.3.2	Følsomheds-vurderinger	27
6	Kalibreringsmodulet	29
6.1	Betragtninger om køretøjets energi	29
6.2	Estimation af parametre	31
6.2.1	Rullemodstandskoefficienterne	31
6.2.2	Luftens densitet	32
6.2.3	Køretøjets <i>drag coefficient</i> , frontareal og masse	32
6.2.4	k -værdierne	33
7	Optimeringsmodulet	35
8	Computersimulering	37
8.1	Background for car energy simulations	37
8.1.1	The Simulink Model	38
8.2	The main model	41
8.2.1	Description of the main model components (blocks)	41
8.2.2	The engine block	44
8.2.3	Dual run model	46
8.2.4	The simulation results	47
9	Foranalyse af metode til overførsel af højdeinformation fra den danske højdemodel til eksisterende plane vejnetsdata.	49
9.1	Formål	49
9.2	Data	49
9.2.1	Frie grunddata	49



9.2.2	Den Danske Højdemodel (DHM)	50
9.2.3	Vejnet	52
9.3	Analyse	54
9.4	Vejnet med højde	57
9.5	Konklusion og perspektivering	59
10	Konklusion	63
11	Referencer	65

2 Baggrund

Trafikforskningsgruppen ved Aalborg Universitet har sammen med Arla Foods AS og Dancar søgt Trafikministeriet om tilskud fra 2011-puljen til forsøg med energieffektive transportløsninger til udvikling af en energieffektiv fartpilot. Trafikstyrelsens Center for Grøn Transport har besluttet at give Trafikforskningsgruppen ved Aalborg Universitet tilskud til et mindre forprojekt, der skal afklare usikkerheder og potentialer i det oprindeligt ansøgte projekt. Dette notat er udarbejdet i forbindelse med forprojektet. Denne afklaring har så i øvrigt ført til en fornyet ansøgning af hele projektet i august 2013, hvor forsøgspuljen for energieffektiv transport havde sin sidste ansøgningsrunde.

Forprojektet (fremover projektet) er blevet udført på Aalborg Universitet i perioden september 2012 til juni 2013. Projektet var kun planlagt til at vare 7 måneder, men forskellige forhold inklusive et specialeprojekt i kølvandet gjorde, at projektet blev forlænget 3 måneder.

Følgende personer har været tilknyttet projektet i perioden:

Erik Kjems, projektleder

Lars Bolet

Darius Plausinaitis

Jan Staunstrup

Morten Stie Laugesen

Rasmus Beck Nielsen

Kapitel 8 er skrevet på engelsk, idet der var tilknyttet en engelsksproget medarbejder og en oversættelse til Dansk vurderedes både bekosteligt og unødvendigt.

3 Resumé

Den grundlæggende hypotese i projektet er, at det må være muligt at spare brændstof i et køretøj, når man kører mere forudseende og tager hensyn til varierende terrænforhold i vertikal retning. Dette bør kunne opnås ved at tilpasse fartgivningen af køretøjet til terrænet. Således bør en mindre reduktion af hastigheden inden køretøjet når terrænets lokale toppunkt (bakketop) og en beskeden øgning i farten når køretøjet når terrænets lokale lavpunkt (bakkedal) give en reduktion i det samlede forbrug. Ved denne tilpasning tillades det at medtage en del af den potentielle energi fra bakketoppen, som på nedkørslen delvist bliver omdannet til kinetisk energi til igen at løfte køretøjet eller blot holde farten uden supplerende motorkraft.

Den gennemgåede litteratur på området bekræftede vores hypotese, idet der både i Sverige, USA og Tyskland har været udført forsøg og udviklingsarbejde med baggrund i samme antagelse. Forsøgene er primært udført i samarbejde med lastbilsproducenter og deres proprietære systemer. Alt andet lige viste samtlige forsøg, at der kunne opnås betydelige besparelser på mellem 6 og 15%.

Projektforløbet blev opdelt i fire pakker.

- Teoretiske overvejelser vedr. et køretøjs bevægelse i bakket terræn.
- Computersimulering af samme situation med beregninger af det samlede energiforbrug.
- Praktiske forsøg med en bil på en nærliggende teststrækning til at give en indikation af mulige besparelser. Denne del blev udført som et kandidatspeciale knyttet til projektet.
- Undersøgelse af anvendeligt kortmateriale med hensyn til kvalitet og tilgængelighed i forbindelse med kortlægningen af vejens tracé.

De teoretiske overvejelser tog udgangspunkt i de kørselsdynamiske forhold omkring et køretøj og blev benyttet til at opbygge en computermodel, som blev etableret i simuleringsværktøjet Simulink/Mathlab. Værktøjet er specielt godt egnet til tidsserieanalyser, idet modellen opbygges af moduler, der sammensættes med en veldefineret indbyrdes afhængighed, og herefter gennemkører en strækning i tidsstep. Således var det muligt at inddrage en del forskellige parametre og analysere deres betydning for det samlede energiforbrug.

To studerende valgte i deres specialeprojekt at udføre et praktisk forsøg, hvor de i en bil ville prøve at opnå en besparelse, svarende til den der var postuleret i hypotesen. I projektet indgik også en sammenligning af deres eksperimentelt bestemte værdier og den opstillede edb-model. Projektet ligger tilgængelig som særskilt rapport (Nielsen & Laugesen, 2013). De studerende fandt en klar brændstofbesparelse ved at køre hastighedstilpasset, omend det skal nævnes, at strækningen de havde valgt var særdeles velegnet til at opnå netop dette.

Ved sammenligning med modellen viste det sig, at det er vanskeligt at sammenligne et praktisk energiforbrug med et teoretisk, idet en stor del af den energi, der går til spilde i motor og udstødning er vanskelig at inddrage i den teoretiske model, som primært ser på kræfter involveret samt energisystemet ud fra ydre forhold såsom terrænet. Fornuftige antagelser omkring det samlede energisystem viser dog, at modellen er ganske anvendelig.

I projektet har det ikke været muligt at bestemme et hastighedsprofil for køretøjet, der tager udgangspunkt i en energioptimal passage af vejstrækningen. Hastighedsprofilen i modellen er tilrettet manuelt



ud fra erfaringsværdierne opnået i de praktiske gennemløb af forsøgstrækningen. Denne tilpasning viste sig ikke overraskende at volde en del vanskeligheder, hvorfor sammenligningen i dag ikke er helt vellykket og vil kræve en del mere udviklingsarbejde. Den grundlæggende ide i den oprindelige projektbeskrivelse indeholdt en automatisk generering af et hastighedsprofil, der bestemmes ud fra varierende terræn, og lå derfor som primært mål for projektet. Forprojektet viser med al tydelighed, at det vil kræve en del mere forsknings- og udviklingsarbejde, at nå frem til dette. Besparelsespotentialer er dog helt åbenlyst, hvorfor en videreudvikling af systemet vil være oplagt.

Modellsimuleringerne viste en besparelse på mellem 10 og 30% afhængig af det valgte energisystem og de ydre omstændigheder, f.eks. strækningens udformning. De studerendes praktiske forsøg fremviste lignende besparelser og brug af forskellige målemetoder gav anledning til en lignende stor spredning i værdierne. En fortsat justering af modellen, der ligger til grund for simuleringen vil kunne komme virkeligheden nærmere. Det viser sig dog, at køretøjsafhængige parametre kan være både vanskeligt at skaffe og ikke nødvendigvis retvisende, hvorfor simuleringen primært bør benyttes til at udpege betydningen af de enkelte parametre og deres betydning for mulige besparelser fremfor absolutte resultater.

Det blev undersøgt, hvorvidt det er muligt at etablere et tilstrækkeligt kortmateriale, der skal ligge til grunde for et system med automatisk genereret hastighedsprofil. Undersøgelsen viste, at ikke alene har vi en meget fin højdemodel i Danmark, men at denne kan tilknyttes vejene med en middelprecision på 5,9 cm, som er mere end rigeligt til formålet. Teknologien til at genere et vektordatasæt indeholdende vejdata med denne højdeinformation ligger også klar. Det eneste spørgsmål, som udestår, er hvordan data skal indgå i et færdigt system, idet datamodellen vil skulle tilpasses måden data skal tilgås på. Dette spørgsmål kan således først besvares, når et system udvikles i forbindelse med en praktisk implementering. Det vil ikke give mening at gøre det før.

4 Indledning

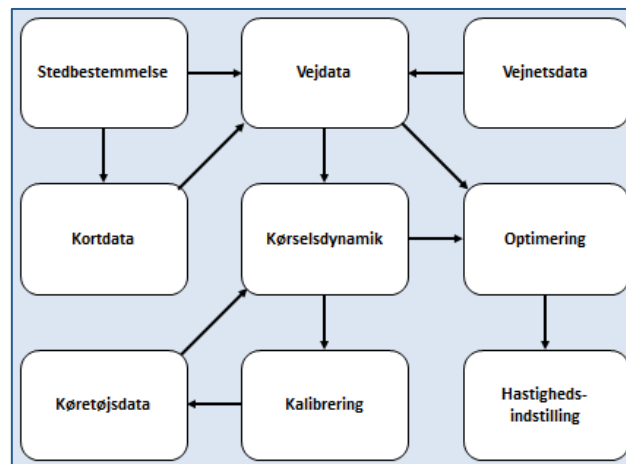
Transportsektoren er en betydelig energiforbruger. Transporten står for ca. 1/3 af det danske energiforbrug (Hethey, Kofoed-Wiuff, & Lindboe, 2011). Ydermere er det især fossile brændstoffer, transporten forbruger. Derfor bidrager sektoren også væsentligt til den uønskede miljøpåvirkning. Ifølge Energistyrelsen er det 31 % af Danmarks CO₂-udledning og tilsvarende andele af de øvrige forbrændingsemissioner. Med til billedet hører, at 78 % af person og godstransporten i Danmarks finder sted på vejene (Energistyrelsen, n.d.). De forhold beror på bosætningsmønstre og erhvervslokalisering, og de forudsætninger ændrer sig næppe. De udgør rammevilkår for udfordringerne med at reducere transportsektorens energiforbrug og emissioner i Danmark. Dermed forklarer de også, at centrale tiltag ikke i synligt omfang formår at udvirke den ønskede energiomstilling i sektoren. I stedet må der tilvejebringes incitament og værktøjer, så borgere og virksomheder kan bidrage uden hermed at pådrage sig en ekstra byrde.

Situationen er ikke speciel dansk, og overalt er der interesse for at optimere transportens brændstofforbrug. Groft sagt falder de strategier, der benyttes, i to kategorier. Teknologisk søges køretøjerne gjort mere energirigtige: Ved brug af nye materialer, reduceres køretøjets vægt, ved bedre formgivning reduceres vindmodstanden, ved bedre motorudformning optimeres virkningsgraden etc. Operationelt søges køretøjernes brug gjort mere energieffektiv gennem transportplanlægning og trafikledelse og ved at påvirke den adfærd, der styrer kørslen. Projektets fartpilot, der anviser en energieffektiv hastighedstilpasningsstrategi, og som behandles i det efterfølgende, hører til den operationelle kategori.

Udfordringerne med at udvikle mulighederne for bedre energiidnyttelse i transportsektoren beskrives fra forskellige ståsteder, blandt andet med udgangspunkt i køretøjet, miljøet og transporten, og med de respektive forskningsfelters modelværktøjer. Man kan rubricere og karakterisere modellerne i tre grupper (Song, Yu, & Wang, 2009):

1. Modeller, der beskriver køretøjsteknologien, forudsiger det pågældende køretøjs brændstofforbrug præcist; men da de simulerer kraftoverførslen i det enkelte køretøj, er de u hensigtsmæssige i forhold betragtninger om vejnettets trafik, og deres inputparametre kan hverken udledes af trafikdata eller af trafiksimuleringsmodeller.
2. Makromodeller giver billeder af energiforbruget på et vejnet baseret på statistiske data om trafikarbejdet og gennemsnitshastigheden, men medtager dog ikke på tilfredsstillende måde den betydning, som kørselsadfærden og kørselsdynamikken har for brændstofforbruget. Modellerne kan derfor ej heller forudsige effekter af forskellige trafikledelsesstrategier.
3. Mikromodeller gengiver køretøjets aktivitet og kan estimere brændstofforbruget for en given vognflåde, en given kørselsadfærd og en vejudformning, så forbruget kan indgå i simuleringsværktøjer som VISSIM. Modellernes begrænsninger ligger i, at de betragter enkeltkøretøjer og fordrer input af et betydeligt omfang.

Song & al. afrunder sin litteraturgennemgang med en bemærkning om, at de betragtede modellers indikatorer for brændstofforbruget ikke umiddelbart kan tolkes som energieffektivitet. Der søges derfor en størrelse, der ud fra kørselsdynamiske parametre udtrykker brændstofforbruget, og som kan omsættes til et mål for energieffektivitet såvel for køretøjet som for en strækning og evt. et vejnet.



Figur 1 – E2C2-projektets hovedmoduler

Det gennemførte forprojekt behandler aspekter af et større udviklingsprojekt, der er blevet døbt E2C2. E2C2 er akronym for Energy Efficient Cruise Control. Som navnet siger, sigter projektet på at udvikle en fartpilot, der løbende tilpasser hastigheden, så den er energieffektiv under hensyntagen til det aktuelle køretøj og til den aktuelle vejstrækning. Projektet kombinerer flere discipliner og arbejder med flere processer, heraf nogle tidligere beskrevne modeller. Indledningsvis giver vi en oversigt over projektets hovedmoduler, som de pt. tegner sig, jævnfør figur 1.

Udgangspunktet er en stedbestemmelse af køretøjets øjeblikkelige placering. Slutresultatet er en hastighedsindstilling, altså en hastighed, som fartpiloten efterfølgende stiler mod. De beregninger, E2C2 gennemfører mellem begyndelsesobservation og slutresultat, falder i fire grupper.

For det første skal vejdata for den strækning, der aktuelt køres på, bestemmes. Vejdata er i denne sammenhæng dels oplysninger, der beskriver vejstrækningens geometri, dels oplysninger, der beskriver trafikale restriktioner på vejstrækningen, dels eventuelt oplysninger, der beskriver vejbelægnings kørselsegenskaber. Mere konkret er der tale om, at følgende oplysninger skal bestemmes for den enkelte station af den vejstrækning, der betragtes:

- Vejgeometri:
 - Længdeprofilet udtrykt ved koten
 - Linjeføringens krumningsradius
 - Tværprofilets sidegradient
- Trafikrestriktioner:
 - Generel eller lokal hastighedsgrænse
 - Vigepligtsforhold i kryds
- Kørselsegenskaber:
 - Rullemodstandskoefficienter
 - Friktionskoefficient

Selv om der er tale om grundlæggende, forholdsvis enkle data for eksisterende vejstrækninger, er det ingenlunde simpelt at tilvejebringe dem. For så vidt angår de vejgeometriske størrelser, koter, krumningsradius og sidegradient, er hypotesen, at disse enten kan udtrækkes af det kommende digitale vej-kort eller kan udtrækkes med tilstrækkelig præcision af det danske topografiske kort. Projektet indehol-



der således et selvstændigt afrapporteret, vellykket forsøg på at bestemme en vejs længdeprofil ud fra kortværkets digitale højdemodel se kapitel 9.

De trafikale restriktioner kunne ideelt set hentes fra en database, tilknyttet det digitale vejkort. Det ville forandre, at de danske vejbestyrelser var forpligtet til at have et ajourført elektronisk vejregister således som tilfældet er i Sverige og Norge (Trafikverket, n.d.; Vegvesen, n.d.). Denne model er imidlertid ikke implementeret. I stedet er vor tanke p.t., at tilvejebringe data om skilte hastighedsbegrænsninger ved en kombination af analyser af Floating Car Data (FCD) og crowdsourcing, hvor trafikanterne bidrager med indrapportering af placeringen af færdselstavler. Vigepligtsforhold tænkes ligeledes kortlagt gennem FCDanalyser i de kryds, der kan identificeres på et kort. De indsamlede data skal så lægges på et medie, som kan give fartpilotsystemet adgang til ajourførte data. Svagheden ved at betjene sig af FCD er, at data fremkommer ved tolkning fremfor ved egentlig indberetning, og at der kan forekomme mistolkning. Svagheden ved at bruge crowdsourcing er, at indberetningen først kan ske efter, at færdselsafmærkningen er ændret i marken; navnlig i forbindelse med midlertidig afmærkning er der altså en risiko for, at de kendte oplysninger ikke er helt ajour.

Det skal bemærkes, at de trafikale parametre, der her er omtalt, kan søges udvidet. Blandt statiske restriktioner, som man kunne overveje at medtage, er tilstedeværelsen af fritliggende fodgængerfelter på vejstrækningen. Blandt dynamiske parametre kunne man tænke på signalanlæg og på jernbaneoverskæringer, hvor det i princippet ville være muligt at modtage styreinformation, så hastigheden kan afpasses til passage i fx en af signalanlæggets grøntider. Ligeledes kunne man tænke i baner af at udveksle information med forankørende trafikanter, så man kan opnå en gensidig afpasning. Alle disse muligheder må dog henlægges til en senere udviklingsfase af E2C2.

Data om vejbelægningens kørselsegenskaber angår belægningens bidrag til rullemodstandskoefficienten samt friktionskoefficienten. Det er størrelser, der påvirker kørselens energiforbrug og den hastighed, som kørslen sikkert kan ske ved. Ingen af størrelserne er umiddelbart kortlagt, og en konsekvens kan derfor være, at man er nødt til, til en begyndelse, at antage defaultværdier.

Det andet hovedmodul beskriver den kørselsdynamik, der optræder. Der er tale om en klassisk, mekanisk model, der som input har dels informationer om køretøjet, dels informationer om vejstrækningen. Selve modellen er beskrevet nærmere i det efterfølgende afsnit. Den skal bruges i de to efterfølgende sammenhænge.

Den kørselsdynamiske model ligger til grund for det tredje hovedmodul, nemlig kalibrering af de informationer, der foreligger om køretøjet, om vejstrækningen og om det miljø, som kørslen sker i. Nogle parametre er ikke kendt eller kan ændre sig i løbet af en tur. Eksempelvis vil massen (vægten) af en mælkebil ændre sig, hver gang der er afhentet råmælk hos en landmand. Ligeledes vil rullemodstandskoefficienten ændre sig, når vejbelægningen skifter type eller stand, fx fra pulverasfalt til grus.

Kalibreringen har til formål at bestemme gode estimater for sådanne ikke konstante parametre på grundlag af registreringer fra den netop tilbagelagte vejstrækning. Kalibreringen vil være en løbende proces, hvor udgangspunktet typisk vil være de senest fundne estimater, men hvor der til stadighed søges forbedrende justeringer.

Den kørselsdynamiske model skal også bruges i det fjerde hovedmodul, selve optimeringen af kørslen på den foranliggende vejstrækning. Princippet er at fastlægge et profil, der udtrykker den maksimale hastighed i den enkelte station af strækningen. Det sker på grundlag af de tilgængelige data om vej-



geometri, trafikrestriktioner mv. Det maksimale hastighedsprofil vil typisk rumme diskontinuerte spring: Hvor der optræder lokal hastighedsbegrænsning vil hastighedsniveauet i ét punkt blive sænket fra den generelle hastighedsgrænse, der ellers gælder. Tilsvarende gælder det ved kørsel gennem en skarp horisontalkurve, at hastigheden skal afpasses til kurvens radius og tværprofilets sidegradient.

Når det maksimale hastighedsniveau er fastlagt, skal det optimale hastighedsprofil findes. Det optimale hastighedsprofil er det, der intetsteds overskrider den maksimale hastighed, og som samtidig mindsker energiforbruget uden at der opstår en uacceptabel forøgelse af køretiden. Den kørselsdynamiske models opgave er i denne forbindelse, at beskrive sammenhængen mellem forskellige hastighedsvalg på strækningen og det afledte brændstofforbrug, så man kan udlede den hastighed, som fartpiloten aktuelt skal stile mod at køretøjet kører med. Også optimeringen er en løbende proces, hvor den foranliggende strækning hele tiden vurderes, og hvor fartpiloten til stadighed justeres.

Det har været forsøgt at inddrage væsentlige dele af teorien i en edb baseret model for at kunne simulere forskellige forhold omkring køretøjet og dets ydre påvirkninger. I modellen har vi udeladt at optimere på motorens virkemåde med hensyn til gearskifte m.m. omend enkelte overvejelser er medtaget i kapitlet. Denne del af projektet fremgår af kapitel 8 og er skrevet på engelsk.



5 Det kørselsdynamiske modul

Vi ønsker at beskrive en energieffektiv hastighedstilpasningsstrategi for et køretøj. Det gør vi med tanke på, at strategien skal kunne lægges ind i en fartpilot. I det øjemed forudsætter vi, at fartpiloten vil få adgang til data om vejens tracé, hastighedsbegrænsninger og vigepligtsforhold mv.

Opgaven fordrer kendskab til de kræfter, der optræder på køretøjet gennem kørslen. Ærindet med dette afsnit er at formidle en teoretisk beskrivelse af de væsentligste af disse kræfter og af den energi, der knytter sig til de enkelte kræfter.

En traditionel fartpilot fastholder køretøjets hastighed på det indstillede niveau. Hvis vi ser bort fra, at vinden kan variere såvel i styrke som i retning, så betyder det på en retlinet, ensrettet vejstrækning, der er vandret, at køretøjets motor skal yde en konstant trækraft. Trækkraften skal netop udligne rullemodstanden og luftmodstanden ved den givne hastighed.

Hvis vejstrækningen ikke er vandret, så skal fartpiloten løbende tilpasse den trækraft, som motoren yder. Under kørsel op ad bakke lagrer køretøjet potentiel energi. Dette svarer til, at trækkraften også skal opveje en stigningsmodstand, for at køretøjet kan opretholde sin hastighed. Motoren belastes altså mere og forbruger mere brændstof.

Under kørsel ned ad bakke frigives potentiel energi. Det bidrager til køretøjets bevægelsesenergi, så kravet til motorens ydelse bliver mindre. Tyngdekraften er konservativ. Det betyder, at al den lejrede potentielle energi i princippet er tilbageført til køretøjets bevægelse, når køretøjet atter befinder sig i sin udgangskote.

Hvis nedkørslen imidlertid sker på en stejl bakke, kan den frigjorte energi overstige det tab, som rullemodstand og luftmodstand bevirker. I så fald vil køretøjet øge sin hastighed ud over det ønskede niveau, så køretøjet må nedbremses. Ved denne bremsning går energi tabt – vi ser i projektet bort fra hybridbiler, hvor køretøjet omdanner bremseenergi til elektricitet, og fra tilsvarende løsninger, der lejrer overskydende bevægelsesenergi, så den senere kan udnyttes. Undlades nedbremsningen, så øges i stedet luftmodstanden mod køretøjet. Herved opstår et øget energitab.

Kørsel i kuperet terræn indebærer yderligere et energitab. Det knytter sig til belastningen af køretøjets motor. Jo hårdere motoren er belastet, des mere brændstof (og dermed energi) forbruger den. Sammenhængen er stort set stykvis lineær. Det er den i de intervaller, hvor den aktuelle gearing virker optimalt. Belastes motoren derimod nær sin maksimale ydeevne, så vil energiforbruget øges uforholdsmæssigt meget.

Hvis kørslen finder sted på en vejstrækning, der ikke er retlinet, så skal endnu et energitab betragtes. Det hidrører fra retningsændringen. Ser vi eksempelvis på et køretøj, der med en given hastighed kører gennem en retvinklet kurve, så har køretøjets kinetiske energi samme størrelse såvel før som i og efter kurven; men i og med at hastighedsvektoren er drejet 90° , er den oprindelige kinetiske energi gradvist gået tabt og erstattet gennem kurven. Ideelt set er denne substitution sket i samme takt som påvirkningen fra rullemodstanden, luftmodstanden og stigningsmodstanden. I modsat fald har der også optrådt en bremsning af køretøjet, så køretøjets fart ikke har været konstant gennem kurven.



Hvis vejen har haft en overhøjde gennem kurven, så er der også forbrugt energi til at dreje køretøjet om dets længdeakse på overgangsstrækningerne. Til gengæld bevirker overhøjden, så længe kurvens horisontalradius er forholdsvis lille, at køretøjet passerer kurven mere sikkert og komfortabelt. Ligeledes bliver sidefriktionen i kurvens radiallinje reduceret.

5.1 Generelle forudsætninger

Vi forudsætter i det følgende om kørslen:

- At den ikke er påvirket af et samspil med anden trafik på strækningen, altså at der er tale om »fri kørsel«,
- At føre og vejrlig ikke lægger begrænsninger på kørslen, samt
- At køretøjet så vidt muligt fremføres ved den aktuelt tilladte hastighed, men dog under respekt for vigepligtsforhold og med tilpasning til sikkerheds- og almindelige komforthensyn ved kørsel gennem horisontalkurver mv.

De to første forudsætninger forenkler situationen, der skal behandles, men de behøver ikke at lægge grænser for en senere videreudvikling af en energieffektiv fartpilot. Eksempelvis kan man forestille sig en hastighedstilpasningsstrategi, der inddrager det aktuelle hastighedsniveau for trafikken på den akutte vejstrækning og i særdeleshed hastigheden af de forankørende køretøjer. Sådanne overvejelser ligger dog uden for projektets rammer.

5.1.1 Hastighedsændrende kraftpåvirkninger

Et køretøjs hastighed ændrer sig som følge af de kræfter, der påvirker køretøjet. Kræfterne kan opdeles på mindst to måder: Én der angår, om kræfterne driver køretøjet frem eller hæmmer det, og én der skelner mellem, om føreren har direkte adgang til at regulere kræfternes størrelse eller ej.

Nogle kræfter virker i kørselsretningen, mens andre virker modsat. Er summen af de første større end de sidste, accelereres køretøjet, og hastigheden stiger. I modsat fald decelererer køretøjet, og hastigheden falder.

En række af kræfterne vil altid virke i den ene eller den anden retning. Det gælder fx rullemodstanden, der altid vil virke imod bevægelsesretningen. Andre kræfter kan imidlertid antage begge fortegn alt afhængigt af situationen. Eksempelvis vil tyngdekraften have en komponent, der er parallel med vejoverfladen, og denne komponent vil være drivende ved kørsel ned ad bakke og hæmmende ved kørsel op ad bakke.

Ud over de kræfter, der angriber med eller mod køretøjets bevægelsesretning, optræder der sideværts virkende kræfter. Disse påvirker ikke direkte køretøjets fart. De kan imidlertid give anledning til retningsændringer, og de influerer på de kørselsdynamiske mekanismer, der afgør, hvor virkningsfuldt køretøjet kan manøvreres.

En række kræfter er bestemt udefra. De knytter sig til naturen, fx vind og luftmodstand, eller til egenskaber ved vejen og køretøjet. Deres størrelse kan eventuelt afhænge af den aktuelle hastighed, men de kan i øvrigt ikke påvirkes af køretøjets fører. Disse kræfter kaldes i det efterfølgende for de påførte (eksterne) kræfter.



Andre kræfter er underkastet førerens kontrol. Disse regulerende (interne) kræfter omfatter køretøjets motorkraft, også i forbindelse med motorbremsning, samt den egentlige bremsekraft, der kan effektueres i køretøjets bremsesystem og i kontakten mellem dæk og vejoverflade.

Når man skal virkeliggøre en energieffektiv hastighedstilpasningsstrategi, sker det ved, at man løbende afpasser de regulerende kræfter til de påførte kræfter. Herved opnår man, at man får den nødvendige drivende eller hæmmende kraft, så køretøjet afpasser sin hastighed mod det tilstræbte niveau. I E2C2-projektet er idéen at give køretøjets fartpilot adgang til tracé- og køretøjsdata og at indbygge algoritmer, der udnytter den viden, der kan tolkes af disse data.

5.2 De optrædende kraftpåvirkninger

Normalt betragtes syv kræfter, når et køretøjs bevægelse skal beskrives kørseldynamisk. Disse omtales kort nedenfor.¹ De fem første er påførte kræfter; den første virker dog kun reaktivt og skaber alene balance. De to sidste kræfter kan henregnes til de regulerende kræfter, som føreren råder over.

5.2.1 Vejens normalreaktionskræfter, F_N

Vejbelægningen modvirker og udligner de kraftkomponenter, der er rettet vinkelret på vejoverfladen, med lige så store og modsat rettede reaktionskræfter, F_N [N]. Den samlede reaktionskraft fordeles på de fire hjul, og den kan opfattes som en kompenserende kraft. Det betyder, at normalreaktionen antager netop den størrelse, der er nødvendig for at køretøjets hjul ikke skal synke ned i vejbelægningen.

Normalt forudsættes det, at vejbelægningen kan opfattes som en plade, der er stiv sammenlignet med dækkene. Endvidere forudsættes det, at vejoverfladen er jævn. At vejbelægningen betragtes som en stiv plade betyder, at vi kan tillade os at se bort fra blivende deformationer i belægningen. At vejoverfladen er jævn betyder, at vi kan antage, at køretøjet ikke skal optage vertikale påvirkninger fra lunger, vulster eller vaskebrætlignende deformationer med relativ kort bølgelængde eller i form af stød fra skader i og lapper på belægningen. Det er således ikke almindeligt at betragte de energitab, der vil opstå i køretøjets affjedringssystem henholdsvis som følge af rystelser af hele chassiset. Det er tillige muligt at antage, at det enkelte dæk har samme deformation under kørslen.

Forudsætningerne betyder endvidere, at normalreaktionskraften ikke ændrer sig fra punkt til punkt, så længe traceringslementerne er uændrede. Dette har naturligvis direkte betydning for rullemodstanden, F_R , og for friktionen, F_F , der begge er knyttet til normalreaktionskraften, jævnfør omtalen nedenfor.

Forudsætningen om, at vejbelægningen kan ses som en stiv plade, er umiddelbart plausibel på veje, der er forsynet med veldimensionerede befæstelser med bundne belægninger. Det gælder også hvor der er tale om en fleksibel belægning, da deformationen i belægningen vil være forsvindende lille, så længe vi ser på et normalt forekommende køretøj. Forudsætningen kan formentlig med rimelighed også antages for gældende på veludførte og vel vedligeholdte ubundne belægninger, når disse ikke er vandlidende.

Forudsætningen om, at vejoverfladen er jævn, er derimod mere problematisk. Den holder vand ved veludførte nye slidlag. Den burde også holde ved lapper efter fx ledningsopgravninger forudsat at reableringsarbejdet er udført strengt konditionsmæssigt; i forhold til praksis kan dette dog være en naiv

¹ For en uddybning af de optrædende kræfter og deres samspil, se fx undervisningsnote *Lars Bolet*:



forventning at gøre sig. Forudsætningen holder åbenlyst ikke i forhold til vejbelægninger, der er skadede som følge af påvirkninger fra trafik, klima eller alder, og hvor sådanne skader ikke er udbedret med en tilbundsgående retablering af vejaksen. Dette gælder desværre store dele af det lidt ældre vejnet, og i særdeleshed de danske kommuneveje.

I forprojektet har vi valgt at se bort fra denne hage ved forudsætningerne. Det antages, at mangelen alene har en begrænset betydning for mulighederne for at opnå fuld effekt af en energieffektiv fartpilot; men det kan bestemt ikke udelukkes, at mangelen i sig selv indebærer et energispild af samme størrelsesorden som den besparelse, som en energieffektiv kørselsstrategi kan resultere i.

5.2.2 Tyngdekraften, F_G

Tyngdekraften, F_G [N], virker i køretøjets tyngdepunkt og er altid rettet lodret mod jordens centrum. Tyngdekraften har størrelsen:

$$|F_G| = M \cdot |g| \quad [1]$$

Hvor:

$$\begin{cases} M & \text{er køretøjets masse (vægt) [kg], og} \\ g & \text{er tyngdeaccelerationen [m/s}^2\text{].} \end{cases}$$

Køretøjets masse, M , er en størrelse, der er kritisk i forbindelse med at definere en energieffektiv fartpilot. I de kørselsdynamiske modeller, som anvendes ved den geometriske udformning af vejanlæg, volder fastlæggelsen af massen ikke de store problemer, da man betragter standardkøretøjer, som repræsenterer yderpunkter i den vognpark, der kører på vejene. I en energieffektiv hastighedstilpasningsstrategi skal man imidlertid se på det aktuelle køretøjs aktuelle masse og altså tage hensyn til, hvor tungt køretøjet er lastet på det aktuelle tidspunkt. Navnlig er der behov for at kunne håndtere det forhold, at massen ændrer sig, når køretøjet lastes og losses. Principielt kunne man veje køretøjet, eller man kunne veje den last, køretøjet aktuelt bærer, og addere køretøjets egenvægt. Alternativt kan man forestille sig, at det ud fra målinger foretaget under kørslen er muligt at give et estimat på køretøjets aktuelle masse.

Tyngdeaccelerationen, g , er rimelig konstant over hele Jorden, og den kan regnes konstant inden for et geografisk afgrænset område som Danmark. Dens størrelse er $|g| = 9,818 \text{ m/s}^2$ i Danmark.²

Den energi, der knyttes til tyngdekraften, er potential energi, E_{pot} [J]. Den potentielle energi afhænger helt af, hvor højt det pågældende legeme befinder sig over 0-koten:

$$E_{pot} = M \cdot |g| \cdot h \quad [2]$$

Hvor:

$$|h| \text{ er den kote [m], som køretøjets befinder sig i.}$$

Når køretøjet bevæger sig en given længde, Δs [m], på en vejstrækning med konstant længdegradient, i_t [–], så ændrer køretøjets potentielle energi sig derfor med:³

² Bemærk, at de danske vejregler systematisk har anvendt den nedrundede værdi, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

³ Længdegradienten, i_t , regnes i vejbygningsfaget positiv, når vejoverfladen stiger i bevægelsesretningen, altså når man kører op ad en bakke. Størrelsen er fastlagt som $i_t = \tan \alpha_t$, hvor α_t er længdeprofils vinkel med vandret.



$$\Delta E_{pot} = M \cdot |g| \cdot \Delta s \cdot i_t \quad [3]$$

Foregår kørslen ned ad bakke, frigives denne energi; sker kørslen op ad bakke, skal energien tilføres køretøjet, og ændringen i køretøjets potentielle energi kan opfattes som en stigningsmodstand, der skal overvindes.

5.2.3 Centripetal- og centrifugalkræfter, F_c

Når et køretøj bevæger sig gennem en horisontalkurve, er det udsat for en sideacceleration, der er rettet mod kurvens krumningscentrum. Sideaccelerationen tilvejebringes dels gennem vejoverfladens tværfald af tyngdekraftens radiale komponent, dels af de friktionskræfter, der virker sideværts mellem køretøjets dæk og vejoverfladen. Sideaccelerationen svarer til, at køretøjet udsættes for en centripetal-kraft, F_c [N], der fastholder køretøjet i en cirkulær bevægelse om kurvens centrum:

$$|F_c| = M \cdot \frac{v^2}{R} \quad [4]$$

Hvor:

- M er køretøjets masse [kg],
- v er køretøjets hastighed [m/s], og
- R er radius [m] i den cirkulære bevægelse.

Køretøjets masse, M , og de udfordringer, der knytter sig til at bestemme massen, er kort beskrevet ovenfor under omtalen af tyngdekraften.

Køretøjets hastighed, v , er nøgleparameteren for den energieffektive hastighedstilpasningsstrategi. Den aktuelle hastighed kan bestemmes af køretøjets speedometer eller på grundlag af tætte GPS-målinger under kørslen.

Horisontalkurvens radius, R , er ideelt set en egenskab ved vejens tracering, og denne forudsætning holder, så længe køretøjet bevæger sig parallelt med vejens referencelinje, typisk vejmidten. Værdien ændrer sig, når man bevæger sig langs vejens tracé, og der optræder retlinede strækninger med uendelig stor radius, cirkelbuer med konstant radius og overgangskurver normalt i form af klotoider, hvor krumningen ændrer sig lineært. Horisontalkurvens radius kunne i princippet hentes fra vejprojekternes oprindelige projekteringsdata, omend disse ofte kun foreligger i analog form. Værdien kan imidlertid også optages fra kort eller luftfotografier i passende målforhold og kvalitet. Den aktuelle kurveradius kan endvidere bestemmes på grundlag af tætte GPS-målinger under kørslen.

Den energi, som et køretøj afsætter ved at køre gennem en kurve med en konstant hastighed, v , afhænger af den retningsændring, φ , som kurven bevirker. Tabet kan udtrykkes som ændringen i kinetisk energi, ΔE_{kurve} [J], i den retning, som køretøjet bevægede sig i ved kurvens begyndelse:

$$\Delta E_{kurve} = \frac{1}{2} M \cdot v^2 \cdot (1 - \cos^2 \varphi) \quad [4]$$

Hvor:

- M er køretøjets masse (vægt) [kg],
- v er køretøjets hastighed [m/s], og
- φ er retningsændringen gennem horisontalkurven [-].

Man skal bemærke, at da farten er konstant, så er køretøjets samlede kinetiske energi uændret. Det energitab, der har været igennem kurven, er udlignet ved, at køretøjet har fået tilført kinetisk energi i den retning, der står vinkelret på begyndeshastigheden:



$$E_{kin} = \frac{1}{2} M \cdot v^2 \cdot (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) = \frac{1}{2} M \cdot v^2 \quad [5]$$

Hvordan den tabte energi er afsat under kørslen gennem kurven, er ikke helt ligegyldigt i relation til at fastlægge en energieffektiv hastighedstilpasningsstrategi. Ved kørsel på vejstrækninger med små retningsændringer eller med store horisontalkurveradier kan luftmodstanden, F_L , og rullemodstanden, F_R , under kurvekørslen have tilstrækkelig virkning til at udvirke energitabet i den oprindelige kørselsretning. I modsat fald skal der enten udføres aktiv bremsning før og i kurven, eller ske en hastighedstilpasning ved at reducere udnyttelsen af køretøjets trækraft.

Det bør herudover bemærkes, at sideaccelerationen kan relateres til en lige så stor, men modsat rettet centrifugalkraft, der virker i køretøjets tyngdepunkt. Denne centrifugalkraft er imidlertid en indbildt kraft, som trafikanterne mener presser dem udad under kurvekørslen. Det, trafikanterne faktisk er udsat for, er, at køretøjet accelereres ind mod kurvens centrum. Traditionelt har vejbygningen baseret sine kørselsdynamiske modeller på centrifugalkraften og ikke på centripetalkraften. De to betragtninger fører til samme resultater.

For at modvirke sideaccelerationen, gives kørebanens tværsnit ofte en overhøjde gennem horisontalkurver, der er forholdsvis lille. På retlinede strækninger er tværsnittet i reglen tagformet og har fald mod begge sider, så vand kan løbe af vejoverfladen. Tværfaldet, i_r , er i reglen af størrelsesordenen 25 %.⁴ Gennem horisontale cirkelbuer har tværsnittet derimod i reglen énsidigt fald mod kurvens centrum. Herved forbedres de kørselsdynamiske forhold gennem kurven, og kørslen bliver mere sikker og komfortabel. Det énsidige tværfalds størrelse beror på vejens dimensioneringshastighed og kurvens radius, men værdien er i reglen ikke større end 60 %. Ændringen mellem tagformet tværprofil og énsidigt fald tilvejebringes gradvis på en overgangsstrækning, hvis denne er tilstede. Hvis ikke, deles overgangsstrækningen i to dele, hvor den ene halvdel placeres før tangentpunktet og den anden i selve kurven.

Endelig bemærkes, at centripetal- eller centrifugalkraften naturligvis ikke er aktuel, når vi alene ser på kørsel på en retlinet strækning.

5.2.4 Rullemodstand, F_R

Rullemodstanden, F_R [N], er udtryk for de energitab, der sker i køretøjets bevægelige dele, eller som altid optræder, når et hjul ruller på en vejoverflade. Det er en sammensat kraft, der består af flere forskellige bidrag. Der er ikke fuld enighed om, hvilke elementer der medregnes i rullemodstanden, og hvilke der bør opgøres separat. Blandt de effekter, der virker, er:

- Den egentlige rullemodstand i form af det moment, som stammer fra, at hjultrykket, F_N , virker i en lille afstand foran hjulakslen,
- Friktionen i køretøjets hjullejer og i transmissionssystem, Deformationsmodstand i det pneumatiske hjuls gummi hidrørende fra indre og ydre friktionstab og hysteresetab,
- Stødmodstand fra hjulenes svingende bevægelse ved kørsel på ujævn vejoverflade,
- Energitab gennem vertikale rystelser af bilkonstruktionen ved kørsel på ujævn og hullet vej.

⁴ Sidegradienten, i_r , regnes i vejbygningsfaget positiv, når vejoverfladen falder mod horisontalkurvens centrum. Størrelsen er fastlagt som $i_r = \tan \alpha_r$, hvor α_r er tværprofillets vinkel med vandret.

Rullemodstanden virker altid modsat hjulets bevægelsesretning, og størrelsen beror på den aktuelle vejbelægning, føret, dækkene og køretøjet. Der eksisterer flere udstyk for størrelsen af rullemodstanden ved et hjul. I de simple modeller anvendes en konstant rullemodstandskoefficient:

$$|\mathbf{F}_R| = \gamma_R \cdot |\mathbf{F}_N| \quad [6]$$

Hvor:

γ_R er rullemodstandskoefficienten [–], og
 \mathbf{F}_N er den normale reaktionskraft i pågældende hjul, jævnfør ovenfor.

Størrelsesordenen for γ_R er typisk 0,012 for personbiler og det dobbelte for lastbiler, jf. Tabel 1.

I mere avancerede modeller har rullemodstandskoefficienten hastighedsafhængige led, og tillige kan der indgå normerede værdier af blandt andet hjultrykket, fx:

$$|\mathbf{F}_R| = \left(\frac{P}{P_0}\right)^\alpha \cdot (\gamma_{R,0} + \gamma_{R,1} \cdot v + \gamma_{R,2} \cdot v^2) \cdot |\mathbf{F}_N| \quad [7]$$

Hvor:

P er det aktuelle hjultryk [Pa]
 P_0 er et standard-hjultryk [Pa]
 α er en konstant
 $\gamma_{R,0}$ er en rullemodstandskoefficients konstante led [–],
 $\gamma_{R,1}$ [s/m] og $\gamma_{R,2}$ [s²/m²] er en rullemodstandskoefficients hastighedsvariable led,⁵
 v er køretøjets hastighed [m/s], og
 \mathbf{F}_N er den normale reaktionskraft i pågældende hjul, jævnfør ovenfor.

Det udtryk, vi anvender i det følgende er en lidt forenklet udgave heraf, hvor vi ser bort fra normaliseringen af hjultrykket:

$$|\mathbf{F}_R| = (\gamma_{R,0} + \gamma_{R,1} \cdot v + \gamma_{R,2} \cdot v^2) \cdot |\mathbf{F}_N| \quad [8]$$

Det energitab, rullemodstanden giver anledning til, fastlægges på traditionel vis som kraft gange vej, idet der naturligvis skal summeres over alle hjul. Hvis hastigheden ændrer sig og rullemodstandskoefficienten *ikke* er uafhængig af hastigheden, så er det nødvendigt, at betragte uendeligt små vejstrækninger ad gangen og dernæst integrere, jævnfør betragtningen for luftmodstanden nedenfor, formel [11]-[15]. Hvis hastigheden derimod er konstant *eller* hvis rullemodstandskoefficienten er uafhængig af hastigheden findes:

$$\Delta E_R = \mu_R \cdot \sum |\mathbf{F}_N| \cdot \Delta L = \mu_R \cdot M \cdot |\mathbf{g}| \cdot i_t \cdot \Delta s \quad [9]$$

Hvor:

μ_R er rullemodstandskoefficienten [–],
 M er køretøjets masse [kg],
 \mathbf{g} er tyngdeaccelerationen [m/s²].
 i_t er vejstrækningens længdegradient [–] og
 Δs er den tilbagelagte vejlængde [m].

⁵ Det antages ofte, at leddet $\gamma_{R,1}$ navnlig har betydning for lastbiler, mens leddet $\gamma_{R,2}$ især har betydning for personbiler.



Tabel 1 - Typiske rullemodstandskoefficienter i henhold til (Garber & Hoel, 2010). Størrelserne er knyttet til udtrykket i formel [7], idet der ikke indgår en ækvivalering til et normeret hjultryk. Leddene $\nu_{R,1}$ henholdsvis $\nu_{R,2}$ skal multipliceres med hastigheden henholdsvis kvadratet på hastigheden.

	$\nu_{R,0}$ [–]	$\nu_{R,1}$ [s/m]	$\nu_{R,2}$ [s ² /m ²]
Personbil	0,012	0	0,000007
Lastbil	0,02445	0,00147	0

Det er p.t. ikke klarlagt, hvordan fastlæggelse af rullemodstandskoefficienterne mest hensigtsmæssigt skal ske. I første omgang vil det formentlig være nødvendigt at basere sig på faste standardværdier.

Hvis effekten skal bearbejdes yderligere, og hvis øvrige parametre i kørselsregnskabet er kendte, kan koefficienterne tænkes estimeret for et konkret køretøj og en konkret vejstrækning ud fra kørselsmålinger under givne rammevilkår.

5.2.5 Vindkræfter og luftmodstand, F_L

Luftmodstandens virkning beror på komplicerede aerodynamiske forhold. Ved et motorkøretøjs bevægelse gennem atmosfærisk luft kan størrelsen af luftmodstanden, F_L [N], imidlertid til praktisk brug angives ved en simpel formel:

$$|F_L| = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_W \cdot A \cdot v^2 \quad [10]$$

Hvor:

- ρ er luftens densitet [kg/m³],
- C_W er en dimensionsløs størrelse [–], der afhænger af køretøjets form og overfladefriktion – størrelsen betegnes ofte ved sin engelske betegnelse *drag coefficient*,
- A er køretøjets frontareal, [m²], og
- v er køretøjets hastighed [m/s].

Luftens densitet, ρ , er en størrelse, der ikke er konstant. Tør atmosfærisk luft har ved havets overflade en massefylde, ρ , omkring 1,30 kg/m³ ved 0 °C og på 1,20 kg/m³ ved 20 °C. Værdien kan variere en del procent, når temperaturen, luftfugtigheden eller barometerstanden ændrer sig, men selvom disse variationer er velkendte, og selvom densiteten med rimelighed bør kunne regnes konstant inden for afgrænsede områder og afgrænset tid, så giver variationerne alligevel udfordringer, når man skal bestemme den aktuelle værdi. Og det skal man, så snart hastigheden når en sådan størrelse, at luftmodstanden kommer til at spille en betydende rolle i kørselens energiregnskab. Det er p.t. ikke klarlagt, hvor nøjagtigt luftens aktuelle densitet bør være fastlagt, og hvordan den mest hensigtsmæssigt måles, herunder om denne måling mest hensigtsmæssigt foretages ved det enkelte køretøj eller centralt.

Størrelserne C_W og A er køretøjsspecifikke og skal derfor fastlægges for det enkelte køretøj. Begge størrelser er væsentlige ved udviklingen af nye køretøjer, og i princippet burde de derfor kunne oplyses af de pågældende fabrikanten. Fabrikant-værdierne tager imidlertid ikke højde for individuelle forhold, herunder for den aktuelle lastning af køretøjet, for montage af ekstra sidespejle eller for det forhold, at man kan kombinere de trækkende køretøjer med forskellige anhængere. Det er p.t. ikke klarlagt, hvor nøjagtigt de to størrelser bør være fastlagt, og hvordan det mest hensigtsmæssigt sikres, at de er oplyst korrekt. Man kan, som tilfældet er det med køretøjets masse, forestille sig, at det ud fra målinger foretaget under kørslen er muligt at give et estimat på størrelserne.



Den energi, som køretøjet mister på grund af luftmodstanden, bestemmes ligeledes som kraft gange vej. Da hastigheden indgår som parameter ved fastlæggelse af luftmodstandens størrelse, er det – medmindre der tilføres energi, som fastholder den aktuelle udgangshastighed – nødvendigt at betragte uendeligt små vejstrækninger ad gangen. Inden for hver infinitesimal lille vejstrækning, ds , vil hastigheden, v , og dermed også luftmodstanden, kunne regnes for uforandret, og det tilsvarende energitab vil derfor være:

$$dE_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_W \cdot A \cdot v^2 \cdot ds \quad [11]$$

De følgende udledninger er blot medtaget til illustration. Hvis der var en en-til-en sammenhæng mellem dette energitab og ændringen i køretøjets kinetiske energi ved kørslen over delstrækningen, ds , ville vi kunne skrive:

$$dE_{kin} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (v - dv)^2 - \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot M \cdot dv^2 - M \cdot v \cdot dv = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_W \cdot A \cdot v^2 \cdot ds \quad [12]$$

Bortkaster vi det ubetydeligt lille kvadratled dv^2 , ville vi få:

$$\frac{1}{v} dv = -\frac{\rho \cdot C_W \cdot A}{2 \cdot M} \cdot ds \quad [13]$$

Lader vi v_0 betegne udgangshastigheden i station 0 og v hastigheden efter, at køretøjet har kørt strækningen s , ville vi følgende finde:

$$\int \frac{dv}{v} = \ln v - \ln v_0 = -\frac{\rho \cdot C_W \cdot A}{2 \cdot M} \cdot \int ds = -\frac{\rho \cdot C_W \cdot A}{2 \cdot M} \cdot s \quad [14]$$

Eller:

$$v = e^{\ln v_0 - \frac{\rho \cdot C_W \cdot A}{2 \cdot M} s} \quad [15]$$

Udnytter vi i formel [13], at $ds = v \cdot dt$, kunne vi tilsvarende udlede et udtryk for, hvordan hastighedens afhænger af tiden.

Konjunktivformerne er brugt bevidst ovenfor. Betragtningens forudsætning om en en-til-en sammenhæng mellem de to opgjorte energier holder ikke. Der er også andre led, som skal medtages i energiregnskabet. Beregningerne forløber derfor slet ikke så enkelt.

Det skal bemærkes, at formel [11] er umiddelbart anvendeligt ved kørsel i vindstille vejr. Formlen bliver dog vanskeligere at anvende, så snart der ikke alene skal tages hensyn til luftmodstanden, men også til vind. Enklest er situationen, når der blæser en konstant vind stik mod kørselsretningen. I så fald skal den hastighed, der indsættes i formlen, være den relative hastighed i forhold til vindens:

$$|F_L| = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_W \cdot A \cdot (v + v_W)^2 \quad [16]$$

Hvor:

| v_W er vindhastigheden [m/s].

Når vejen svinger, så vinden *ikke* længere blæser vinkelret på køretøjets front, bliver formelen ulige mindre gangbar, idet C_W såvel som A , så skal erstattes af værdier, der modsvarer retningen af den resulterende vindpåvirkning under kørslen. Disse værdier kan ikke antages at være kendte.

Hvis vinden ikke har konstant styrke, eller hvis der langs vejen optræder forskelligt læ mod vinden, bevirker disse forhold naturligvis, at forudsætningerne forandrer sig undervejs. Dette er alle momenter, som der ikke er ambitioner om at kunne håndtere. Men modelbetragtninger kan give et fingerpeg



om størrelsesordenen af den indflydelse, som vekslende vindforhold kan have på hastighedsoptimeringen, og kan dermed være med til at fastlægge og begrænse, hvor stor en nøjagtighed det er rimeligt at tilstræbe ved fastlæggelsen af øvrige parametre, der indgår i den kørselsdynamiske model.

5.2.6 Trækraften, F_T

Køretøjets trækraft, F_T [N], kommer fra motorens forbrænding og overføres via differentialer og drivaksler til køretøjets drivende hjul. Herved kommer den til at virke i kontaktfladerne mellem vejoverfladen og de drivende hjuls dæk, hvor den giver sig udtryk i friktionskræfter, som normalt driver køretøjet fremad; men som ved motorbremsning kan være decelererende.

Motorens maksimale effekt, P_{Max} [W], udtrykkes normalt som et produkt:

$$P_{Max} = M_{Max} \cdot p_T \quad [17]$$

Hvor:

$$\left| \begin{array}{l} M_{Max} \text{ er køretøjets maksimalt tilladte masse (vægt) [kg], og} \\ p_T \text{ er motorens ydeevne i form af effekt pr. masseenhed [W/kg].} \end{array} \right.$$

Ved normal kørsel udnyttes alene en del, δ , af denne effekt. Kaldes motorakslens omdrejningstal for ω [s^{-1}], findes størrelsen af motorakslens moment, M_M [J], til:

$$|M_M| = \delta \cdot M_{Max} \cdot \frac{p_T}{2 \cdot \pi \cdot \omega} \quad [18]$$

Med en virkningsgrad i transmissionssystemet på η [-] og et udvekslingsforhold på n [-] bliver den samlede størrelse af momenterne på de drivende hjul, M_H [J]:

$$|M_H| = \delta \cdot \eta \cdot n \cdot M_{Max} \cdot \frac{p_T}{2 \cdot \pi \cdot \omega} \quad [19]$$

Har hjulene en radius på r_H [m], så bliver størrelsen af den samlede trækraft, F_T [N], under den underforståede forudsætning, at den nødvendige friktion kan skabes mellem de drivende hjul og vejoverfladen:

$$|F_T| = \delta \cdot \eta \cdot n \cdot M_{Max} \cdot \frac{p_T}{2 \cdot \pi \cdot \omega} \cdot \frac{1}{r_H} \quad [20]$$

For hver omdrejning af hjulaksen bevæger køretøjet sig afstanden $2 \cdot \pi \cdot r_H$ [m]. Det svarer til hastigheden $v = 2 \cdot \pi \cdot r_H \cdot \omega / n$ [m/s]. Indsættes denne hastighed i udtrykket for trækraften, findes:

$$|F_T| = \delta \cdot \eta \cdot M_{Max} \cdot \frac{p_T}{v} \quad [21]$$

Hvor:

$$\left| \begin{array}{l} \delta \text{ er den udnyttede del af motorens maksimaleffekt [-],} \\ \eta \text{ er virkningsgraden i køretøjets transmissionssystem [-],} \\ M_{Max} \text{ er køretøjets maksimalt tilladte masse (vægt) [kg],} \\ p_T \text{ er motorens ydeevne pr. vægtenhed [W/kg],} \\ v \text{ er køretøjets hastighed [m/s].} \end{array} \right.$$

Bemærk, at hvis man anvender udtrykket i formel [21] i sine energibetragtninger, jævnfør de skitserede beregninger nedenfor, så forudsætter man, at motorens energiforbrug er ligefrem proportional med den udnyttede del af motorens maksimaleffekt. Denne sammenhæng holder måske, så længe der er tale om forholdsvis små ændringer i belastningen af motoren og der køres i samme gear.

Ved nedbremsning i forbindelse med forudsigelige, naturlige hastighedstilpasninger, antages trafikanterne i en vis udstrækning at betjene sig af motorbremsning. Motorbremsningen altid finder sted med



fuld effekt, og det effekt- og energitab, som virkningsgraden udtrykker, virker »modsat«, svarende til energien overføres fra hjulenes bevægelse og til gnidningsvarme i motoren.

Motorbremsningen kan beskrives ved en bagudrettet kraft, F_{MB} [N]. Den udtrykkes ikke ved formlen [16], men må dog antages at have en tilsvarende sammenhæng med den effekt, der udefra skal påføres for at dreje motorakslen:

[22]

Hvor:

$$\begin{cases} P_{MB} \text{ er den effekt, der skal til for at dreje motoren [W],} \\ \eta_{MB} \text{ er virkningsgraden i køretøjets transmissionssystem under motorbremsning [-],} \\ v \text{ er køretøjets hastighed [m/s].} \end{cases}$$

De kraftoverførselsmodeller, der er fundet i litteraturen, er i princippet formet over den her beskrevne læst, omend de tilgår problemet med yderligere varianter. Navnlig to forhold skal nævnes. I en model, der er udviklet ved *Virginia Polytechnic Institute and State University* kobles brændstofforbruget til den udnyttede motoreffekt som et anden grads polynomium (Park, Rakha, & Ahn, 2012):

$$\dot{m}(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot P(t) + \alpha_2 \cdot P(t)^2; \forall P(t) \geq 0 \quad [23a]$$

$$\dot{m}(t) = \alpha_0; \forall P(t) < 0 \quad [23b]$$

Hvor:

$$\begin{cases} \dot{m}(t) & \text{er det aktuelle brændstofforbrug [g/s] eller [l/s],} \\ P(t) & \text{er den aktuelle effekt [W]} \\ \alpha_0 & \text{er brændstofforbruget ved tomgang,} \\ \alpha_1 \text{ og } \alpha_2 & \text{er modelparametre, som er estimeret for såvel bykørsel som for landevejskørsel} \end{cases}$$

Såvel denne amerikanske model, som en model fra *Linköping Universitet* i Sverige håndterer gearvalg gennem en vifte værdier for udvekslingsforholdet, m_j , hvor indeks j angiver, hvilket af køretøjets gear, der aktuelt anvendes. (Hellström, Åslund, & Nielsen, 2010)

At det er væsentligt at skelne mellem motorens brændstofforbrug og motorens leverede effekt, illustrerer følgende tal. Køretøjer med forbrændingsmotorer, der anvender benzin eller diesel har en effektivitet på 0,1-0,3; det betyder, at alene 10-30 % af energien i det forbrugte brændstof ender med at drive køretøjet frem. (Evans et al., 2009) (Meyer, 2007)

Den opstillede model, formel [21], betragter den (mekaniske) effekt, som motoren leverer. Modellen medtager derimod ikke følgende tab:

- Varmetab under forbrændingsprocessen – denne andel tegner sig for cirka 65-70 % af energitabet sammenholdt med brændstoffets den totale energimængde,
- Friktionstab i selve motoren
- Energi, der anvendes til at drive køretøjets generator, servostyring, air condition, mv.

Derimod bør der ved brug af modellen tages højde for virkningsgraden af gearret (typisk $\eta = 0,95$), af differentialet (typisk $\eta = 0,97$) og af koblingen, hvis der skiftes gear under kørslen.

5.2.7 Friktionskræfter, F_f

Friktionen stammer fra kontakten mellem køretøjets dæk og vejoverfladen. Det er praktisk at skelne mellem friktionskræfterne i to forskellige kørselssituationer.



Ved almindelig kørsel, hvor køretøjet navnlig drives fremad af motorens trækraft, optræder tangentielle friktionskræfter, \mathbf{F}_{Ft} , som overfører trækraften gennem køretøjets drivende hjul. Friktionskraften kan i dette tilfælde opfattes som en kompenserende kraft, der altid vil virke modsat kræfter, der er parallelle med vejoverfladen og søger at få de enkelte dæk til at glide på vejbelægningen. At friktionskraften er kompenserende betyder, at den samlede friktion antager den størrelse og retning, der netop er nødvendig for at modvirke, at køretøjets dæk slipper og begynder at glide.

Ved opbremsning aktiveres i stedet, men på samme måde, bremsende, tangentielle friktionskræfter, \mathbf{F}_{Ft} , idet køretøjets bremsesystem reducerer eller standser hjulenes rotationshastighed.

I begge situationer bevirker radiale friktionskræfter, \mathbf{F}_{Fr} , at køretøjer holder (eller, når køretøjet drejes, regulerer) banen i sideværts retning.

Friktionskraftens størrelse er begrænset opad af den normalkraft, \mathbf{F}_N , der kan overføres i kontaktfladen, og af friktionsegenskaberne mellem dækket og vejoverfladen. Begrænsningen kan udtrykkes:

$$|\mathbf{F}_F| = f \cdot |\mathbf{F}_N| \leq \mu \cdot |\mathbf{F}_N| \quad [24]$$

Hvor:

$$\left| \begin{array}{l} f \\ \mu \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{er den friktionskoefficient [-], der aktuelt optræder,} \\ \text{er den friktionskoefficient [-], der maksimalt kan etableres.} \end{array}$$

Friktionskraftens størrelse kan herudover være begrænset af komfortensyn, altså af hvor stor en accelerationspåvirkning, trafikanten finder komfortabel. Under normale føreforhold vil det være komfortensynet, der er begrænsende for sideaccelerationen og derved for størrelsen af den radiale friktionskraft, der optræder.

Bemærk, at de to friktionskomponenter, \mathbf{F}_{Ft} og \mathbf{F}_{Fr} , der virker parallelt med hjulets bevægelsesretning henholdsvis vinkelret herpå, begrænser hinanden indbyrdes. Sammenhængen er tilnærmelsesvis elliptisk, men normalt antages denne friktionsellipse at være udartet til en cirkel, således at det gælder, at:

$$\sqrt{f_t^2 + f_r^2} \leq \mu \quad [25]$$

Hvor:

$$\left| \begin{array}{l} f_t \\ f_r \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{er den friktionskoefficient [-], der aktuelt optræder i den tangentielle retning,} \\ \text{er den friktionskoefficient [-], der aktuelt optræder i den radiale retning,} \end{array}$$

5.2.8 Den resulterende kraft, \mathbf{F}_{RES}

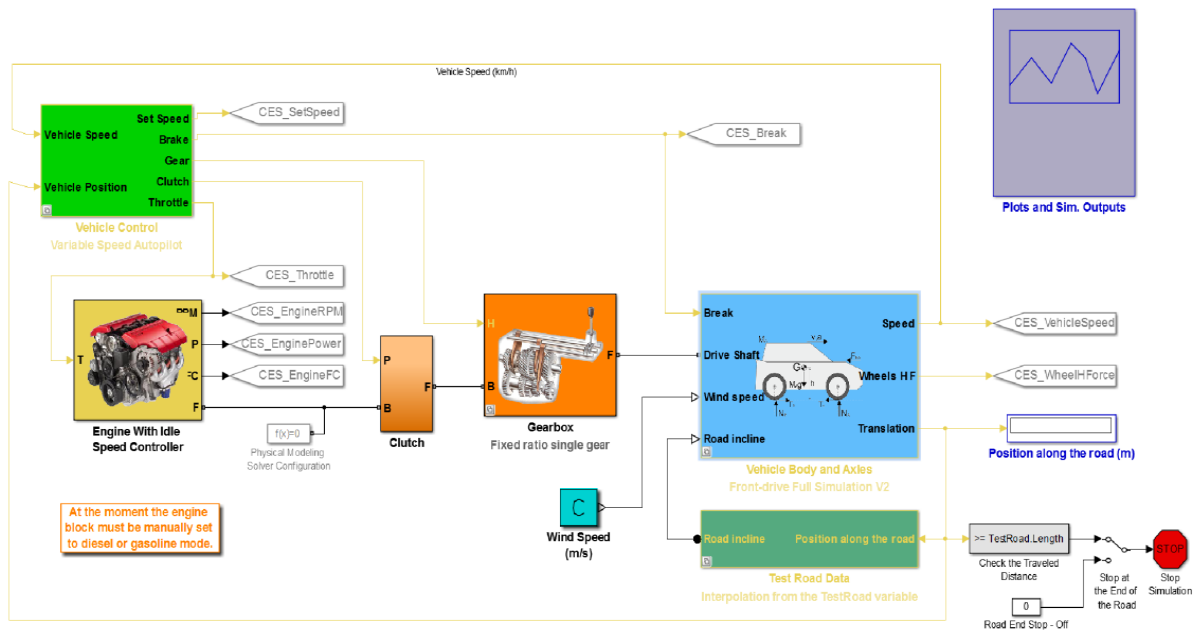
Hvis resultanten af alle de påvirkende kræfter er 0, så vil køretøjet enten holde stille eller bevæge sig med uændret hastighed og retning. I modsat fald accelereres eller decelereres køretøjet, jævnfør Newtons 2. lov:

$$|\Sigma \mathbf{F}| = |\mathbf{F}_G + \mathbf{F}_C + \mathbf{F}_N + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_R + \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_{MB} + \mathbf{F}_F| = |\mathbf{F}_{RES}| = \kappa \cdot M \cdot \left| \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right| \quad [26]$$

Hvor:

$$\left| \begin{array}{l} \kappa \\ M \\ d\mathbf{v}/dt \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{er en dimensionsløs parameter [-], der indregner, at ikke alene køretøjets masse ændrer} \\ \text{hastighed, når køretøjet accelererer eller decelererer, men at også køretøjets roterende} \\ \text{dele i denne forbindelse ændrer rotationshastighed og derved binder eller frigør energi,} \\ \text{er køretøjets masse (vægt) [kg],} \\ \text{er den tidsafledede af hastigheden altså køretøjets acceleration [m/s^2].} \end{array}$$

5.3 Den opstillede Simulink®-model



Figur 2 - Screen-dump af den udviklede Simulink-model.

En kørselsdynamisk model er opstillet i MatLab®-applikationen Simulink®. Simulink er udviklet til simulering, analyse og kontrol af komplekse modeller og dynamiske systemer. Modellen er opbygget som illustreret på figur 2, idet hver blok repræsenterer et system af algoritmer, der både omfatter kørselsdynamik og bilfysik.

5.3.1 Test af Simulink modellen

Modellen er i foråret 2013 testet i et kandidatspeciale på civilingeniøruddannelsen i veje og trafik ved Aalborg Universitet. Specialeprojektet (Nielsen & Laugesen, 2013) omhandler indsamling af empiriske data i kørselsforsøg, hvor der tilstræbes en brændstofbesparelse ved kørsel med hastighedstilpasning frem for en konventionel fartpilot. Efterfølgende benyttes de empiriske data til at sammenligne den opstillede simuleringsmodel med forsøgsførerne, for at undersøge om man ved at sammenholde teori og praksis kan verificere modellen.



Figur 3 - Udrejst profil af den valgte testlokation. (Nielsen & Laugesen, 2013)

Forsøgene er kørt på en cirka 2,2 km lang strækning af en mindre lokalvej i åbent land i Rebild kommune. Ved valg af forsøgsstrækning er der lagt vægt på, at testkørslerne skal foregå som fri, men sikker og forsvarlig kørsel, at linjeføringen skal være forholdsvis ret, at strækningen ikke rummer væ-



sentlige kryds, og at den vertikale kurvatur rummer flere korte bakker, der kan afspejle sig i de anvendte kørselsstrategiers målte energiforbrug.

Forsøgskørslerne er gennemført med en standardpersonbil, Renault Laguna (årgang 2011, 2,0 diesel med 150 hk). Standardparametre for denne model er indlagt i simuleringsmodellen. Forsøgene indsamler data fra gennemkørsel med traditionel fartpilot med låst hastighedsvalg og fra en alternativ, intuitivt fastlagt kørselsstrategi, der bør være mere energieffektiv end fartpilots. I alt er gennemført 15 gennemkørsler med hver af de to kørselsstrategier.

Om selve forsøgsresultaterne hedder det i kandidatprojektets konklusion (Nielsen & Laugesen, 2013):

”Analysen af forsøgskørslen viser en besparelse på 27,7 % ved kørsel med energieffektiv hastighedstilpasning frem for fartpilot, hvortil besparelsen er dannet på baggrund af beregninger ud fra målingerne ved den manuelle tankning. Besparelsen indsamlet fra bilens kørecomputer er derimod beregnet til 15,3 %. Forskellen vurderes til at skyldes forsøgsudførelsen og usikkerheder omkring empirien, hvor den forbrugte brændstofmængde har stor indflydelse på den procentuelle forskel mellem før og efter målingerne. Hvis der havde været udført flere forsøgskørsler eller længere ture, ville usikkerhederne omkring brændstofmålingerne været reduceret. Videodokumentation og analyse af kørecomputerens realtidsinformationer viste en besparelse på 17,2 % for selve forsøgsstrækningen. På trods af måleusikkerheder ved empirien vurderes det fortsat, at brændstofbesparelse ligger mellem 15,3–27,6 % ved samme forsøgsstrækning og kørselsforudsætninger. Desuden medførte hastighedstilpasningen kun en rejsetid der var 1,5 % længere end for fartpiloten.”

De opnåede energibesparelser er ganske høje sammenholdt med tidligere dokumenterede forskningsresultater fra større veje, fx 3 % for lastbiler (Hellström, Ivarsson, Åslund, & Nielsen, 2009) og 12 % for personbiler (Ahn, Rakha, & Moran, 2011). Resultatet skal dog ses på baggrund af, at forsøgsstrækningen blev udvalgt med henblik på at opnå størst mulig besparelse, blandt andet faldt koten over de sidste 75 % af strækningen omtrent 30 meter.

Forsøgskørslens data er søgt sammenholdt med beregninger i den opstillede simuleringsmodel. I det øjemed er modellen kalibreret i forhold til forsøgets strækning og køretøj. Umiddelbart viser simuleringen, at der kun kan forventes opnået en besparelse på 2 % ved energieffektiv hastighedstilpasning, men denne beregning tager ikke højde for det enorme energispild der er i bilens forbrændingssystem og ringe udnyttelse af brændstoffet. Sættes brændstoffets udnyttelsesgrad til ca. 25% vil brændstofbesparelsen således blive 8%. Tilbage står problemet med hastighedstilpasningen i modellen, som der skal arbejdes videre med i et evt. opfølgende projekt.

Projektet angiver i øvrigt følgende betragtninger og anbefalinger (Nielsen & Laugesen, 2013):

- Så længe simuleringsmodellen står alene og ikke er i stand til at koble sig til hastighedsprofilen for en fartpilot, er det vanskeligt at sammenligne modelresultater med forsøgskørsler,
- Nøjagtigt datainput er afgørende for resultatet, hvorfor der er behov for flere forsøgskørsler,
 - Simple forsøgskørsler kan formentlig klarlægge mere præcise informationer om inert, speederposition og brændstofforbrug og dermed skabe grundlag for bedre sammenligninger,
- Der bør foretages yderligere undersøgelser i forskellige terræntyper for at verificere, om kørselsmetoden kan bruges generelt; i det øjemed er det vigtigt at have et forsøgskøretøj, hvor kørselsmonitoreringen viser realtidsinformationer, der både er valideret og med en høj pålidelighed.



- Gearvalg bør inddrages i forsøgskørslerne, da der her ligger en potentiel besparelse,
- Det bør afklares, hvordan brændstofbesparelse ved hastighedstilpasning vægtes mod et eventuelt merforbrug af tid ved kørslen,
- Det bør undersøges, hvordan kørsel med energieffektiv hastighedstilpasning både påvirker og påvirkes af den øvrige trafik, og hvilken indvirkning dette har på brændstofbesparelsen,
- Hvis en energieffektiv fartpilot kan udvikles ud fra forrige overvejelser, vil det være muligt på sigt at implementere idéer om en energieffektiv fartpilot, som udover vertikalgeometrien også inddrager vejens horisontalgeometri, skiltning og trafikforhold.

5.3.2 Følsomheds-vurderinger

Den opstillede Simulink-models følsomhed er testet for variationer i enkelte af dens grundparametre. Resultaterne er sammenstillet på figur 4. Om de variationer, parametrene spænder over, skal følgende oplyses.

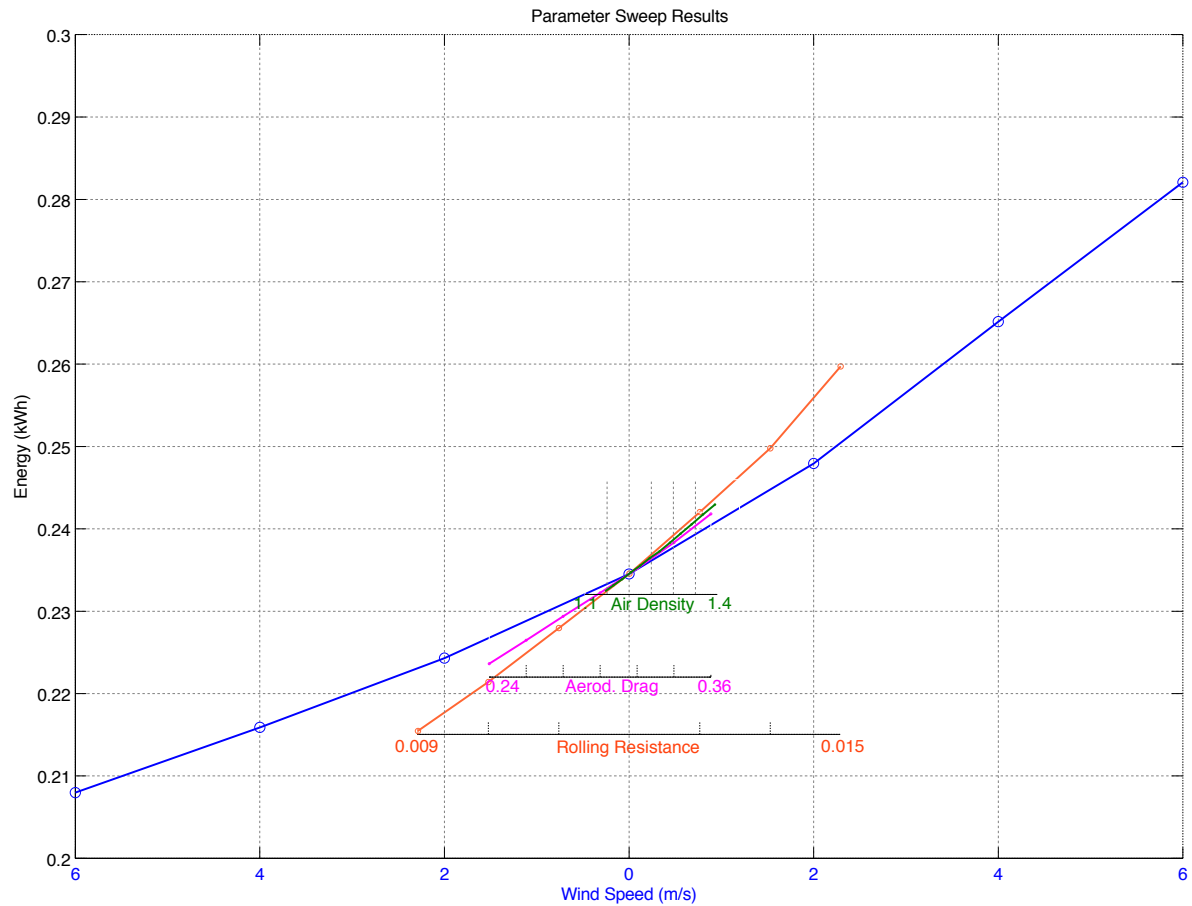
Luftens massefylde, ρ , varierer i intervallet 1,1–1,4 kg/m³. Den aktuelle værdi afhænger af luftens temperatur, fugtighed og tryk. Værdien er typisk omkring 1,3 kg/m³ ved 0 °C. Det anvendte spænd kan sammenholdes med den variation, massefylden vil have ved en temperaturvariation fra +35 °C til –20 °C cirka 200 m over havets overflade.

Drag coefficient, C_W , er behandlet i intervallet 0,24–0,36. Værdierne svarer til de, der gælder for sports- og personbiler. Varevogne har en værdi omkring 0,5, og lastbiler med anhænger ligger omkring 0,7–0,9.

Rullemodstanden er udtrykt gennem én koefficient, der ligger i intervallet 0,009–0,015. Niveauet svarer til at køre med gode dæk på en fast vejbelægning, fx asfalt, i god stand.

Endelig varierer vindhastigheden i intervallet fra –6 m/s til +6 m/s, hvor fortegnet minus angiver, at der er medvind. Den vind, der er betragtet, overstiger ikke såkaldt »jævn vind« (vindstyrke 4: 5,5–7,9 m/s). Vinden er alle steder regnet parallelt med køreretningen, og det er forudsat, at vinden angriber køretøjet på samme vis forfra som bagfra, altså, at produktet $C_W \cdot A$ er ens uanset vindretningen.

Det fremgår af figuren, at usikkerhed i fastlæggelse af rullemodstanden har den største indflydelse inden for det normalt forekommende variationsinterval. Vindpåvirkningens indflydelse er ikke uvæsentlig, når der er tale om vind, der kan mærkes. De udfordringer, som vinden i øvrigt giver med hensyn til læ, stød og vindretning i forhold til kørslen, er ikke søgt behandlet.



Figur 4 - Simulink-modellens følsomhed over for variationer i luftens vægtfylde (Air Density), køretøjets drag coefficient (Aerod. Drag), rullemodstandskoefficient (Rolling Resistance) og direkte

Tilsvarende følsomhedsanalyser bør naturligvis gennemføres for andre køretøjstyper og andre belægnings. Modelberegninger, der illustrerer, hvordan parametrene usikkerhed indvirker på den energibesparelse, som forskellige strategier for hastighedstilpasning giver, bør endvidere udføres.

6 Kalibreringsmodulet

Kalibreringsmodulet er væsentligt i *E2C2*-konceptet. Det er det fordi adskillige af de grundparametre, der indgår i den kørselsdynamiske model, og derfor influerer på forudsætningerne for den sidste hovedproces, optimeringsmodellen, ikke kan forudsættes at være konstante i hverken tid eller sted. Kalibreringsmodulets opgave er derfor, at verificere, om energiforbruget i den netop faktisk gennemførsel kørsel modsvarer det resultat, som den kørselsdynamiske model kommer frem til. Ifald dette *ikke* er tilfældet, skal parametre i den kørselsdynamiske models justeres på en systematisk måde, så modellen giver retvisende resultater, indtil vejstrækningen ændrer karakter eller køretøjet gør et holdt.

Selv om kalibreringsmodulet altså er væsentlig for at udvikle en praktisk duelig, energieffektiv fartpilot, så er det en komponent, vi ikke er stødt på, i nogle af de artikler, vi har fundet om energieffektive fartpiloter. Et par svenske arbejder (Sahlholm & Wanglund, 2009) og (Sahlholm & Johansson, 2010) kommer nærmest, idet de beskriver forsøg, hvor man på grundlag af registreringer fra et antal gennemkørsler med en lastbil er i stand til at give et ganske godt estimat af stigningsforholdene på en overordnet vejstrækning.

E2C2-projektets idé er, som nævnt, at estimere værdier for grundparametre på baggrund af registreringer af tid, sted og brændstofforbrug på den netop gennemkørte vejstrækning. Nogle parametre skal kalibreres én gang for hver ny tur, der i værksættes – køretøjets masse er et eksempel herpå. Andre parametre, fx rullemodstandskoefficienten, skal kalibreres, når vejstrækningen ændrer karakter. Som udgangspunkt anvendes de senest fundne grundparametre til den kalibreringsberegning, der forestår, men der kan naturligvis tænkes situationer, hvor grundparametrene i stedet bør *resettes* til en default-værdi.

Efterfølgende betragtninger om køretøjets energi er en skitse af, hvordan kalibreringsmodellen kan tænkes at virke.

6.1 Betragtninger om køretøjets energi

Vi fortsætter vore betragtninger af et køretøj i bevægelse. Køretøjet bevæger sig nu, under de førnævnte generelle forudsætninger, på en vejstrækning, hvis linjeføring er retlinet.

Vi betragter køretøjets bevægelse mellem to snit, ① og ②, der ligger så tæt på hinanden, at vi kan tillade os at gøre yderligere en række forenklende forudsætninger:

- At delstrækningens længdeprofil er retlinet, men ikke nødvendigvis vandret,
- At vejbelægningen er ensartet på hele delstrækningen, så rullemodstand og friktionsforhold ikke ændrer sig undervejs,
- At en eventuel radialgradient (tværfald) indvirker konstant under kørslen på delstrækningen,
- At kørslen på delstrækningen finder sted i ét og samme gear, samt
- At gearingen er afpasset den aktuelle motorbelastning, så der optræder en lineær sammenhæng mellem ydelsen fra køretøjets motor og kraftoverførslen gennem køretøjets drivende hjul under kørslen på delstrækningen.

Endvidere forudsætter vi, at kørslen finder sted i vindstille vejrlig. Det betyder, at vi alene skal tage hensyn til luftmodstand, men ikke til vindpåvirkninger, herunder vindstød, der indvirker skævt i forhold til køretøjets bevægelsesretning.



Vi kalder stationeringen i snit ① for s_1 , koten i snittet for h_1 , tidspunktet, hvor køretøjet befinder sig i snittet, for t_1 , og hastigheden, som køretøjet har i snittet, for v_1 . De tilsvarende størrelser i snit ② kalder vi for s_2 , h_2 , t_2 henholdsvis v_2 .

Vi har således afstanden, højdeforskellen, gennemkørselstiden og hastighedsændringen mellem de to snit:

$$\Delta s = s_2 - s_1 \quad [27a]$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 \quad [27b]$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad [27c]$$

$$\Delta v = v_2 - v_1 \quad [27d]$$

Vi bestemmer nu ændringen i kinetisk energi, E_{kin} , og i potentiel energi, E_{pot} , mellem de to snit, idet vi for enkeltheds skyld ser bort fra den dimensionsløse faktor κ fra formel [26], og idet vi udnytter, at længdeprofilens vinkel med vandret, α_t , er beskeden, hvorfor det om længdegradienten gælder, at $i_t = \tan \alpha_t \approx \sin \alpha_t = \Delta h / \Delta s$:

$$\Delta E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot M \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \quad [28]$$

$$\Delta E_{pot} = \quad [29]$$

Hvor:

M	er køretøjets masse (vægt) [kg],
g	er tyngdeaccelerationen [m/s ²],
i_t	er vejoverfladens længdegradient [-], regnet positiv ved stigning i bevægelsesretningen

Generelt gælder, at ændringen i energi er summen af det arbejde, som aktivt virkende kræfter, \mathbf{F} , udfører over den strækning, s , hver af disse kræfter virker over:

$$\Delta E = \sum |\mathbf{F} \cdot \mathbf{s}| \quad [30]$$

Tyngdekraften optræder altid og svarer for ændringen i potentiel energi. For et køretøj, der ikke bremses på delstrækningen, optræder herudover alene rullemodstanden, \mathbf{F}_R , luftmodstanden, \mathbf{F}_L , og motorens trækraft, \mathbf{F}_T . Alle disse tre kræfter virker langs vejoverfladen over afstanden, Δs , mellem de to snit ① og ②. De tre kræfter kan dog ikke forudsættes at være konstante over delstrækningen.

Flytter vi nu snittene ① og ② uendeligt tæt på hinanden, $\Delta s \rightarrow ds$, opnår vi, at også højdeforskellen, gennemkørselstiden og hastighedsændringen bliver infinitesimalt små: $\Delta h \rightarrow dh$, $\Delta t \rightarrow dt$, $\Delta v \rightarrow dv$, og da de tre kræfter, jævnfør formel [8], [10] og [21] beror på størrelsen af køretøjets hastighed, kan vi tillade os at betragte dem som konstante over denne forsvindende lille bevægelse:

$$dE_{kin} = (-F_R - F_L + F_T) \cdot ds \quad [31]$$

Hvis vi nu antager, at den betragtede delstrækning er vandret, $dh = 0$, kan vi udlede et udtryk for den acceleration, a , som køretøjet har. Vi indsætter udtrykkene fra formlerne [8], [10] og [21]:

$$dE_{kin} = M \cdot v \cdot dv + \frac{1}{2} \cdot M \cdot (dv)^2 = (-F_R - F_L + F_T) \cdot ds = \left[-(\gamma_{R,0} + \gamma_{R,1} \cdot v + \gamma_{R,2} \cdot v^2) \cdot M \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_W \cdot A \cdot v^2 + \delta \cdot \eta \cdot M_{Max} \cdot \frac{p_T}{v} \right] \cdot ds \quad [32]$$

Udnytter vi, at $ds = v \cdot dt$, kan vi, når vi bortkaster det ubetydeligt lille kvadratled $(dv)^2$, forkorte:



$$a = \frac{dv}{dt} = -(\gamma_{R,0} + \gamma_{R,1} \cdot v + \gamma_{R,2} \cdot v^2) \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot C_W \cdot A}{M} \cdot v^2 + \delta \cdot \eta \cdot \frac{M_{Max} \cdot p_T}{M \cdot v} \quad [33]$$

Hvor:

- a er køretøjets acceleration [m/s²],
- v er køretøjets hastighed [m/s],
- γ_R er rullemodstandskoefficienterne, jævnfør formel [8],
- g er tyngdeaccelerationen [m/s²],
- ρ er luftens densitet [kg/m³],
- C_W er køretøjets *drag coefficient* [-], jævnfør formel [10],
- A er køretøjets frontareal, [m²], og
- M er køretøjets masse [kg]
- δ er den udnyttede del af motorens maksimaleffekt [-], jævnfør formel [21]
- η er virkningsgraden i køretøjets transmissionssystem [-],
- M_{Max} er køretøjets maksimalt tilladte masse (vægt) [kg],
- p_T er motorens ydeevne pr. vægtenhed [W/kg],

6.2 Estimation af parametre

Vi nærmer os nu et udtryk, som vi kan bruge til at estimere nogle af de parametre, som vi ikke kan måle, og som vi ikke kender med sikkerhed. Vi antager, at det vil være muligt løbende at opsamle sammenhørende værdier af tidspunktet, t , samt køretøjets aktuelle position i form af et koordinatsæt, (x,y) , og aktuelle brændstofforbrug, \dot{m} .

På grundlag af en serie af samholdende tids- og positionsmålinger vil det, når vi ser på kørslen over en kortere delstrækning, $\Delta s = \sqrt{x^2 + y^2}$ være muligt at give estimater for den aktuelle hastighed, $v \approx \Delta s / \Delta t$, og, når successive delstrækninger betragtes, for den aktuelle acceleration, $a \approx \Delta v / \Delta t$.

Vi antager endvidere, at der er en kendt sammenhæng mellem det akkumulerede brændstofforbrug, $\Delta B = \sum \dot{m}$, og den energi, som køretøjets motor har leveret over strækningen, hvor motoren har været belastet ensartet i samme gear. Hvis sammenhængen er lineær, gælder $k \cdot \Delta B = \Delta s \cdot \delta \cdot \eta \cdot M_{Max} \cdot p_T / v = \Delta t \cdot \delta \cdot \eta \cdot M_{Max} \cdot p_T$, og så giver formel [33] os følgende billede, hvor de målte størrelser er markeret med rødt:

$$a = \frac{dv}{dt} = -(\gamma_{R,0} + \gamma_{R,1} \cdot v + \gamma_{R,2} \cdot v^2) \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot C_W \cdot A}{M} \cdot v^2 + k \cdot \frac{\Delta B}{\Delta s \cdot M} \quad [34]$$

Hvis den betragtede vejstrækning *ikke* er vandret kan vi formentlig nå en fornuftig tilnærmelse til samme formel ved at subtrahere eller addere det brændstofforbrug, ΔB_{pot} , der modsvarer det energibidrag, som bindes henholdsvis frigives ved kørsel op eller ned ad en bakke, jævnfør formel [29]. Antager vi, at vi råder over en digital terrænmodel med god repræsentation af koten, så vil tids- og positionsmålingerne tillade os, at finde estimater for den aktuelle højde, $h = h(x,y)$, og dermed også for den aktuelle længdegradient, $i_t \approx \Delta h / \Delta s$, og ændringen i potentiel energi.

I udtryk [34] er tyngdekraften, g , naturligvis kendt. De resterende størrelser, $\mu_{R,0}$, $\mu_{R,1}$, $\mu_{R,2}$, ρ , C_W , A og M samt k -værdierne, rummer forskellige udfordringer.

6.2.1 Rullemodstandskoefficienterne

Rullemodstandskoefficienterne, γ_R , beror på den aktuelle vejbelægning, føret, dækkene og køretøjet. Typiske værdier kan findes i litteraturen, jævnfør foranstående Tabel 1.



Hvis øvrige parametre, navnlig ρ og M , er kendte, kan koefficienterne tænkes estimeret for det konkrete køretøj og den konkrete vejstrækning ud fra kørselsmålinger i frigear, så motorens trækraft er elimineret, og med forskellige udgangshastigheder. I princippet er denne fremgangsmåde enkel, men hagen er, at vi nødsages til at foretage øvelsen, hver gang køretøjet bevæger sig ind på en ny vejstrækning.

Der kunne være behov for at få vurderet, om den fejl, der begås ved alene at anvende standardværdier, er væsentlig i forhold til den nøjagtighed, hvormed den optimale hastighed kan fastlægges, og i bekræftende fald:

- hvor stor forskel der er på de γ_R -værdier, der estimeres for samme køretøj på forskellige vejstrækninger,
- hvor stor forskel der er på de γ_R -værdier, der estimeres for samme vejstrækninger for forskellige køretøjer af samme type,
- hvorvidt der kan opstilles reference γ_R -værdier for en given vejstrækning, således at de γ_R -værdier, som gælder for et specifikt køretøj, kan udtrykkes ved en køretøjsspecifik faktor kombineret med disse reference-værdier,
- hvor følsomme slutresultaterne er over for usikkerhed i estimererne af γ_R -værdierne sammenlignet med følsomheden over for andre optrædende usikkerheder, herunder målenøjagtigheden.

6.2.2 Luftens densitet

Atmosfærisk lufts massefylde, ρ , kan variere en del procent, når temperaturen, luftfugtigheden eller barometerstanden ændrer sig. Det er derfor væsentligt, at kende den aktuelle værdi, så snart hastigheden når en sådan størrelse, at luftmodstanden kommer til at spille en betydende rolle i kørselens energiregnskab.

Der er behov for at vurdere, hvordan luftens densitet kan måles med tilstrækkelig nøjagtighed, og hvorvidt denne måling mest hensigtsmæssigt foretages ved det enkelte køretøj eller centralt. I givet fald behøver man ikke at estimere sig frem til denne parameter i kalibreringsmodellen.

6.2.3 Køretøjets drag coefficient, frontareal og masse

Produktet $C_W A$ i princippet konstant og køretøjsspecifikt, når kørslen sker i vindstille. Størrelsen ændrer sig imidlertid, hvis det trækkende køretøj får en ny anhænger, ligesom den ændrer sig, hvis et køretøj uden faste sider, læsses eller losses. Følgelig er det nødvendigt at fremkomme med et estimat på denne størrelse.

Som udgangspunkt vil det formentlig være fornuftigt at anvende den senest estimerede værdi som default for en ny køretur, men værdien bør forholdsvis tidligt på turen søges verificeret.

Køretøjets aktuelle masse, M , spiller ligeledes ind på navnlig luftmodstandens betydning.

For en personbil kan massen default sættes til en standardværdi, fx lig køretøjets egenvægt med tillæg af vægten af én person. Hvis køretøjet undtagelsesvis lastes hårdere, vil dette i reglen gælde en hel tur, og føreren bør derfor have mulighed for at overskrive defaultværdien eller ”bestille” et estimat.

En lastbils masse vil ændres ved lastning og losning undervejs, og lasten kan meget vel overstige køretøjets egenvægt. Der er behov for at vurdere, om lasten hensigtsmæssigt og med tilstrækkelig hastighed kan vejes automatisk på køretøjet, om føreren skal have adgang til at angive vægten af den aktuelle last efter hver standsning af køretøjet, eller om der alene skal ske et estimat i kalibreringsmo-



dellen. I sidstnævnte tilfælde vil det også her som udgangspunkt formentlig være fornuftigt at anvende den senest estimerede værdi som default, hver gang køretøjet har gjort et ophold.

6.2.4 k -værdierne

Faktoren k i formel [34] rummer dels et produkt fra en række faktorer, der relaterer sig til det aktuelle køretøjs motor og det gear, køretøjet aktuelt anvender, dels faktoren δ , der udtrykker hvor stor en del af motorens ydeevne, der aktuelt anvendes. Faktoren k er altså en størrelse, der helt beror på den øjeblikkelige køresituation. Ser vi bort fra størrelsen δ , er de indgående faktorer knyttet til køretøjets motor, differentiale, gearing mv. og bør altså kunne udtrykkes som en parameter, der er bestemt af gearvalget.

Når alle øvrige størrelser i formel [34] er kendt, kan faktoren k beregnes, også selv om de enkelte parametre, der indgår i k , ikke er fastlagt.

7 Optimeringsmodulet

Det at bestemme den energimæssigt optimale hastighedsstrategi ved kørsel ad en rute, er, matematisk set, et ikke uspændende problem. Heller ikke, når rutens tracé er kendt, og der eksisterer en kørselsdynamisk model. Problemet har da også kastet en del artikler af sig, hvoraf (Schwarzkopf & Leipnik, 1977) i reglen angives som *first-writer*.

De fleste artikler behandler delproblemer; navnlig optimeringen på en delstrækning, hvor der ikke optræder ændringer i hastighedsbegrænsningen, og hvor linjeføringens kurvatur kan negligeres, således at der alene skal tages højde for variationen i længdeprofilet. Selv under disse forenkledte forudsætninger, der problemet ikke trivielt.

Problemet kan forenkles ved at opdele ruten i delstrækninger, der kan optimeres hver for sig. Det er påvist, at man på en vandret, retlinet strækning kører mest energieffektivt ved at opretholde en konstant hastighed. Iagttagelsen kan udvides til også at gælde strækninger, der har beskeden, men konstant længdegradient, og strækninger, der har store horisontalkurver. (Chang & Morlok, 2005)

Man kan således betragte de mellemliggende delstrækninger isoleret og optimere dem med hensyn til passage af en bakke, eller tilpasning til en ændret hastighedsgrænse mv. På disse ændringsstrækninger gælder altså en begyndelseshastighed og én sluthastighed, som kan fastlægges ud fra vejgeometri eller ud fra trafikale restriktioner.

(Hooker, 1988) undersøger fire kørselssituationer, og udleder generelle anbefalinger for en energieffektiv kørselsstrategi: a) *cruising*, altså kørsel, hvor den traditionelle fartpilot kan fungere, idet den optimale hastighed beror på køretøjets størrelse, motor mv., t, b) acceleration til *cruising*-hastigheden, c) kørsel mellem signalanlæg og d) kørsel på bakker.

Problemet kan betragtes som en programmeringsopgave, og første udfordring består da i at få fastlagt hvilken dele, der skal optimeres. Energiforbruget nedbringes naturligvis, når man sænker hastigheden, men i problemets kontekst ligger implicit, at merforbruget af tid ikke må blive arbitrært stort. Én måde at håndtere denne udfordring er at fastlægge et (realistisk) tidsforbrug, som ikke må overskrides. En anden måde er at fastlægge et bånd, inden for hvilket hastigheden tillades at variere (Fröberg, Hellström, & Nielsen, 2006). Alternativt kan man definere en objektfunktion, der vægter tids- og energiforbrug sammen i én fælles parameter, der skal optimeres. Herved reduceres problemet i princippet til at være en (sekvens af) lineær(e) programmeringsopgave(r). (Hellström et al., 2010)

Trods disse forenklinger, tilbagestår udfordringen, at hastighedsstrategien involverer beslutninger om tidspunkt for hastighedsændring og for gearskifte, og at hver af disse beslutninger kan træffes på et vilkårligt tidspunkt. Hver beslutning åbner for en uendelighed af kørselsmønstre, og der er behov for at behandle og sortere disse på en systematisk måde, der gør det muligt at finde det bedste – eller i det mindste et, der ligger tæt på det bedste.

På *Linköping Universitet i Sverige* har man arbejdet med en model, der medtager gearskifter, idet en række valg udelukkes, fordi de ikke leder mod det hastighedsniveau, der skal tilstræbes. (Hellström et al., 2010)



Virginia Tech Transportation Institute, USA, betragter delstrækninger i mindre segmenter, der hver for sig beregnes i endnu mindre trin. Det påpeges, at beregningsomfanget er betydeligt, og at det derfor er en udfordring at få gennemført en fuld beregning ved brug af traditionelle algoritmer i løbet af den tid, det tager at gennemkøre et segment. I stedet kan evt. anvendes en heuristisk algoritme. Ud over at spare beregningstid håndterer denne algoritme også gearskift. (Park et al., 2012), (Park, Rakha, Ahn, & Moran, 2011) Begge de to sidstnævnte metoder synes at pege mod brugbare løsninger af det overordnede problem.

Samlet set, er vurderingen, at der er arbejdet med en stor del af de udfordringer, der er knyttet til optimeringsmodulet. Der udestår stadig nogle, men en store udfordringer skønnes at være dels at få sammensat delløsningerne, så de udgør en konsistent model, dels at sikre, at denne model også kan afvikles under kørsel.



8 Computersimulering

8.1 Background for car energy simulations

The system modeling (system simulation) approach allows analyzing quickly complex dynamic systems. The alternatives are to solve and optimize a number of mathematical equations manually or to do many tests with the real systems. Both of the later approaches can be very complicated and time consuming tasks. In addition the test on the real systems most often are very expensive. This is not only due to the price of the system (in our case – the car), but also the cost of a test setup which can warranty tests under exactly the same environmental conditions and the same test inputs. As mentioned in (Nielsen & Laugesen, 2013) it was quite difficult to recreate the same test conditions when the car test campaign was done.

The simulations are based on the mathematical background described in the chapter “*Det kørselsdynamiske modul*” above, and allow solving automatically the set of equations. In addition the simulation tools often have facilities that can automatically derive the optimal solution for a given system.

MATLAB[®] and Simulink[®] are widely known as numerical computing environment and simulation tools built by Mathworks[®]. Their application areas range from business, economics to automotive and aerospace engineering. One of the primary advantages of employing Simulink (and simulation in general) for the analysis of dynamic systems is that it allows us to quickly analyze the response of complicated systems that may be prohibitively difficult to analyze analytically. Simulink is able to numerically approximate the solutions to mathematical models that we are unable to, or don't wish to, solve "by hand."

Simulink is a modeling tool used in a number of industries and academia for various kinds of simulations. Here are just a few examples of its uses in industry:

- A fuel system for the Airbus 380 (“Airbus Develops Fuel Management System for the A380 Using Model-Based Design,” 2012)
- Ford Motor Company and Pi Technology develop fuel cell systems (“Ford Motor Company and Pi Technology Develop Ford Focus Fuel Cell Vehicle Systems with Model-Based Design and Automatically Generated Production Code,” 2006)
- Iveco develops a shift range inhibitor system for mechanical 9- and 16-speed transmissions in six weeks (“Iveco Develops a Shift Range Inhibitor System for Mechanical 9- and 16-Speed Transmissions in Six Weeks,” 2012)
- Scania develops Fuel-Saving Driver Support System for Award-Winning Long-Haulage Trucks (“Scania Develops Fuel-Saving Driver Support System for Award-Winning Long-Haulage Trucks,” 2011)

Over the years Simulink has been integrated with many software tools developed by third party developers and it was augmented with many different kinds of direct interfaces to measurement equipment, hardware tools, software tools, databases and Internet GIS services. It also now has an extensive library of prebuilt components for model construction that can be used in simulations of many vastly different systems.

In addition Simulink supports automatic code generation (C, HDL). This means that a Simulink model can be converted to an executable code. This code can be directly deployed to the compatible hard-

ware platforms. In some of the Simulink applications mentioned above the automatically generated code from Simulink was directly used in the final products. In our case it could be the code for the smart autopilot for real world tests with prototype autopilot hardware.

8.1.1 The Simulink Model

The Simulink model is simulating the car dynamics and energy consumption based on the key simulated car parameters, road height profile data and a few additional parameters. The principal diagram of the model is shown in Figure 5. The model simulates the car driving from the start of the test road segment until it reaches the end of the segment. Ideally the simulation shall produce results that match exactly the equivalent measurements done on a real test car for the given road segment. Usually a calibration step is needed to achieve a match of results.

The car data and some of the simulation related data are stored in a MATLAB file and are loaded when the Simulink model project is opened or when the user loads them manually. At the same time the prepared road related data and the throttle or speed curves are loaded from separate files. At this point the model is ready for execution.

The configuration file defines what type of the car it is. At the moment personal cars and two axle trucks are supported by the model. All car body, transmission and environment parameters can be changed freely before simulation.

The simulation model follows the car dynamics theory that was described in the chapter “*Det kørselsdynamiske modul*” above. In principle the model is re-computing all equations governing the car dynamics at a predefined time interval or additionally – when certain internal simulation process conditions are met.

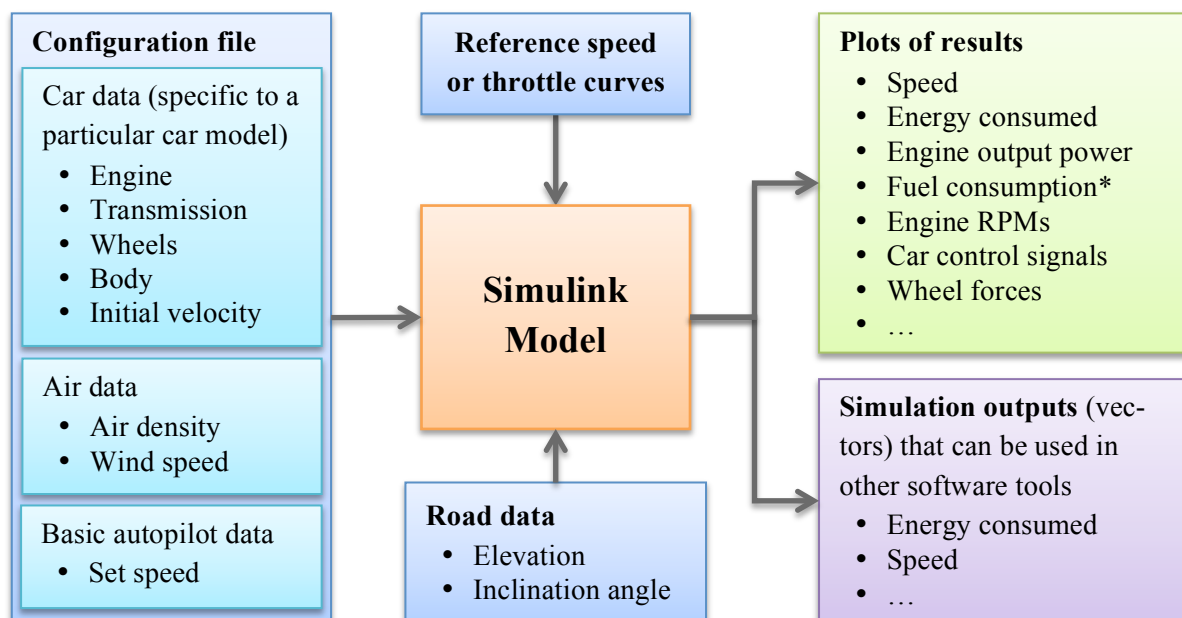


Figure 5 - Principal diagram of the Simulink model.

The car related data are taken from the car manufactures documentation and articles. Sometimes additional data must be taken from some independent car test laboratories as the car manufacturers not always publish all needed information about their cars. In general the manufacturers publish more in-

formation about their trucks than about personal cars, but the situation varies from manufacturer to manufacturer.

Some additional car dynamics related mathematical formulas and more general car data for the simulations and for data crosscheck were taken from books (Genta, 2006) and (BOSCH, 2007).

The test road data is the road elevation profile, from which the inclination angles can be derived. The car body simulation is based only on the inclination angle of the road. The test road data for the simulation can be artificial or based on GPS measurements from an existing road segment.

The car speed is controlled by a basic autopilot (standard car autopilot) or by user predefined car speed curves or throttle position curves. The car speed curves can be based on tests with a real car. However, there are some limitations in the current model on how accurately the model can follow these speed curves. One of the ultimate goals of the overall research project was to control the speed of the energy efficient car by the smart autopilot that takes into consideration the elevation change of the road ahead of the car. Research and development of this autopilot would be one the main goals of the follow up projects.

The simulation results are displayed in plots and can be saved to files or copied to other programs (like for example Microsoft Excel) for further analysis and visualization. The modeling environment in principle allows to inspect or have as an output (simulation result) any parameter or signal in the model.

When the simulation model is used for a new car model or car type it must be calibrated before the actual use for energy simulations. This is because some car parameters do vary from car to car and some data about the car are missing and must be derived from tests. Also there can be some small deviations between a real car and the simulation due to a few abstractions in the car simulation model. The calibration can be done by comparisons of the measurements from the real car dynamics tests and the model runs that are done on the same road segment. A set of controlled car runs with specific car control patterns must be carried out to collect necessary car dynamics data (like transmission losses, engine braking power, and rolling resistance).

The model described above is the main test and research model in this project. Based on it a model for simulation comparisons was developed where two cars on the same road segment are simulated at the same time. In this setup the two cars typically have two different control strategies. For example the speed in one car can be maintained by a basic autopilot while the other car is controlled by the optimal throttle position curve (the optimal curve for the given test road segment). In this way the two car speed control strategies or the optimal speed curves can be directly compared in one easy step.

Now the following sections will describe the two models in more details.

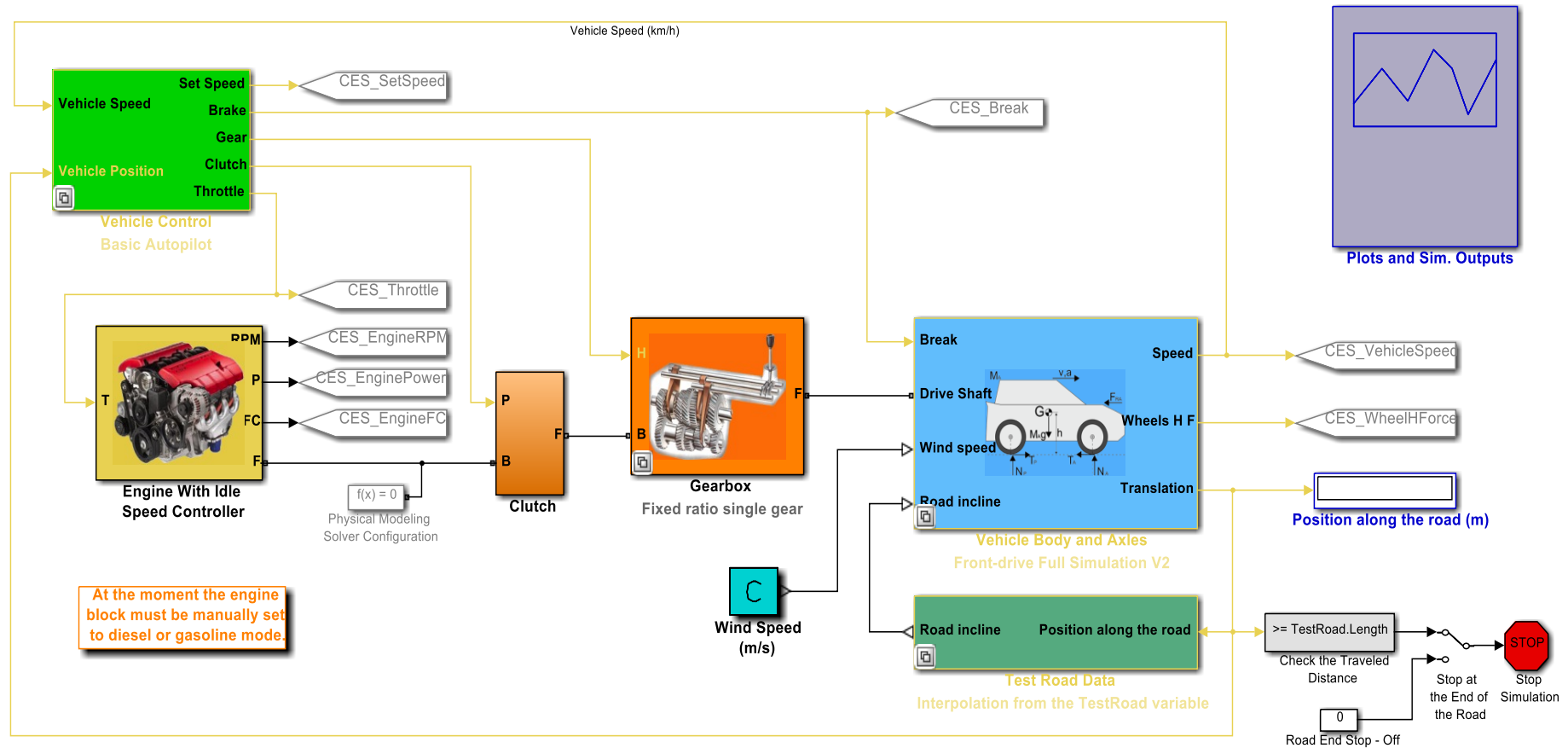


Figure 6 - Simulink model. Legend: Vehicle control - green. Engine - yellow. Clutch and gearbox - orange. Vehicle body - blue. Test road data - green.



8.2 The main model

In the Figure 6 the main Simulink model is shown. In Simulink notation the model consist of blocks that are executing a particular sub-part of the model. In our model the main blocks are

- Vehicle control block (green)
- Engine block (yellow)
- Clutch (orange)
- Gearbox (orange)
- Vehicle body and axles (blue). This block also contains the rest of transmission that goes after the gearbox.
- The test road data block (green)

The model part being responsible for plotting and export of results is contained in the “plots and simulation outputs” block.

Each of the blocks internally is built from other, more basic blocks that simulate particular car parts or implement the formulas presented in chapter 5 above. Some of the blocks are provided by the simulation tool supplier. A part of these blocks are dedicated for a car or as general mechanical simulations. The rest of the model must be built from basic blocks. In this case one such basic block often implements one mathematical, control or data presentation function.

The models subdivision into blocks allows easy model modifications where one block can be replaced with another one that implements the same functions, but the internal implementation or the algorithms are different. This means that the rest of the model does not need to be redesigned.

Simulink has built-in support for such block substitutions, where a number of blocks that implement a particular function, but have different implementations (performance), can be organized into libraries.

Before the simulation starts the user configures, which particular block version from each library has to be selected for the model.

The car simulation is using this feature and the configurable blocks from libraries in the main model are marked with a double square icon in the left bottom corner of such block. For example the model has tree implementations of the manual gearbox, cf. the description below.

8.2.1 Description of the main model components (blocks)

8.2.1.1 The test road data block

A car simulation needs the road data to simulate the car dynamics correctly. The car body/dynamics simulation block is using the road inclination angle to simulate the car dynamics and the load on the engine. The road inclination angle at any time instance is provided by the Test Road Data block. The internal implementation of the road data block is shown in Figure 7. In essence this block implementation consists of two look-up tables.

The road inclination values are derived from the test road height profile by a specially developed MATLAB code. The Test Road Data block is responsible for providing of the current road inclination angle for a given test road point. It is using the current car location information for the given time instance. This information is the output of the car body simulation block and it is fed as input to this block.

For this project a real road height profile was measured using GPS surveying equipment by our students. The data from the survey is used in this simulation example and is shown in Figure 8. The simulation starts from the point on the left side and finishes on the right side. The simulations are stopped when the car reaches the end of the road.

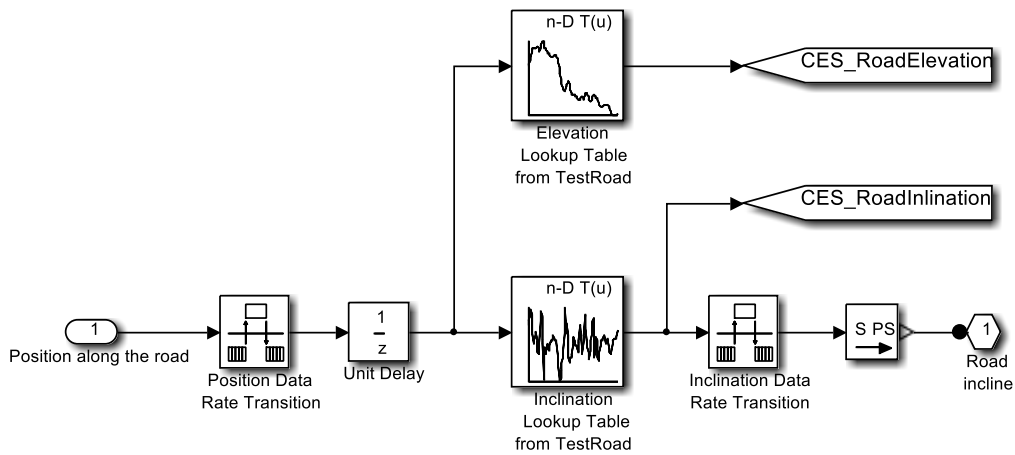


Figure 7 - The road data block of the Simulink model.

Road data from any source (a measurement campaign or a CAD design) can be used in the model as long the height data also includes means to derive the distance between the height measurement points.

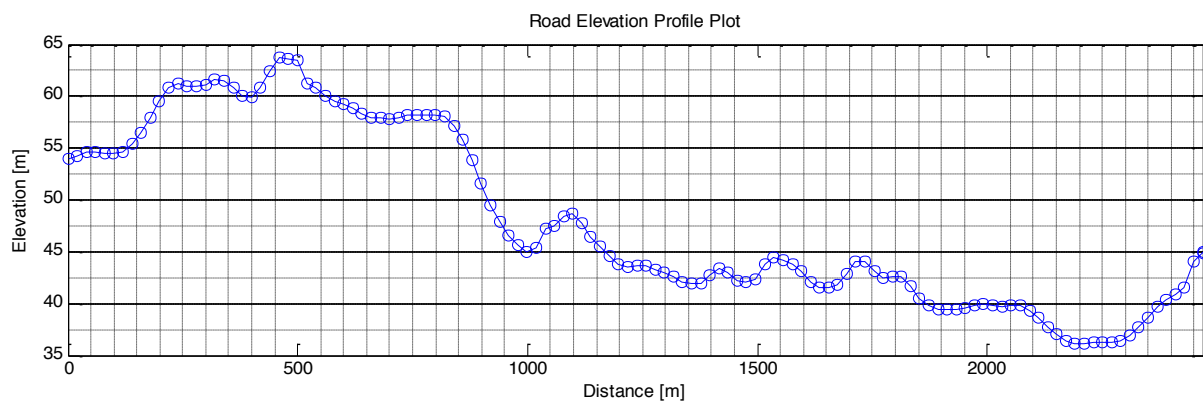


Figure 8 - Longitudinal profile for test road section measured by GPS surveying.

The rate transition blocks are needed for simulation integrity as different parts of the model are re-computed at different rates. This allows to speed up the simulation without a significant precision loss.

8.2.1.2 The car body block

The car body block simulates transfer of energy from the gearbox to the car wheels, cf. Figure 9. The transmission simulation includes inertia and losses. The rotational motion of the wheels is then transformed into car body longitudinal motion by the tire blocks. The tire blocks simulate the rolling and friction forces as described in chapter 5 above.

The vehicle body simulation block (blue) simulates body inertia, air resistance, gravity and other related forces. Most of them resist the car motion.

All motion resisting forces in the model are propagated through the wheels, differential and the gear-box all the way back to the engine. It creates load on the engine. If the road is very steep or the engine is too weak for the given driving scenario – the engine will stall like it would in a real world situation.

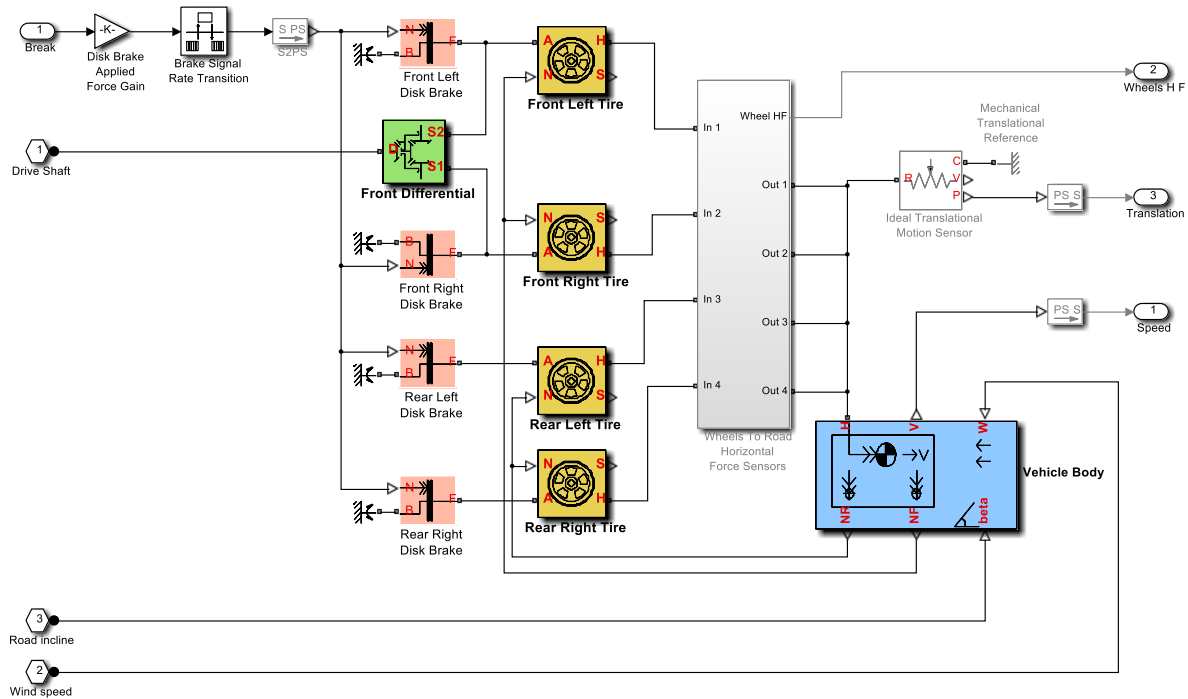


Figure 9 - Car body block of the Simulink model. Legend: Vehicle body - blue. Tires - yellow. Differential - green. Brakes – red.

The sensor block allows to measure longitudinal forces created by the wheel to road interaction. In this setup the back wheels will create only car motion resisting forces. This is used for the model verification.

The red blocks are simulating breaks and can be used in case the car is going too fast (for example due to downhill).

8.2.1.3 Wind speed block

The model is simulating air resistance (in the above mentioned block). The wind speed and density are adjustable. By default the wind speed is set to a constant 0 m/s in the wind speed block, but it can be changed to match the real world conditions. In the current model implementation the actual wind speed constant is defined in the simulation configuration file.

8.2.1.4 The gearbox block (fixed ratio version)

This model has three implementations of the manual gearbox. One is very detailed and simulates exactly the operation of the gearbox.

The second implementation is a bit more abstract. It can still simulate gear changes, but it simulates less accurately the power transfer during gear shifts. This block is used when a higher simulation speed is required and the simulation accuracy is not so important.

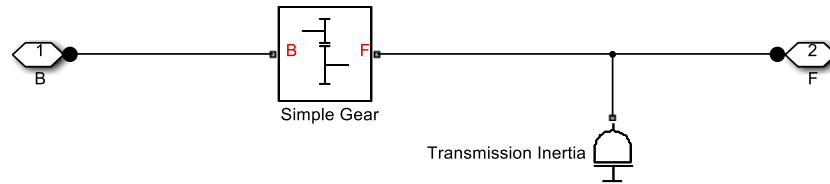


Figure 10 - Gearbox model with fixed ratio. Used when gear switching do not take place.

The third implementation simulates a constant gear ratio gearbox. The gear ratio is configured at the start of the simulation and it is not changed during simulation. This implementation has the fastest simulation performance, but can be used only when gear shifting is not used.

In this project all simulations were done without gear changes. This is because the gear shifting strategy has a significant influence for the fuel consumption. Therefore in this project it was chosen to narrow the scope of research to the case when the gears are not changed during the test runs – both real world and simulated. Due to this here will be briefly described just the most basic gearbox implementation version. The other gearbox implementation versions may be used in follow on projects.

The gearbox shown in Figure 10 has a fixed ratio, which is defined in the simulation configuration file. Both inertia and losses for the gearbox are defined in the same configuration file. The losses depend also on the selected gear, because the losses are smaller for the direct gear (1:1 ratio).

8.2.2 The engine block

In Figure 11 the engine block is shown. The generic engine block is provided by Simulink and its min/max RPMs, power and torque parameters (curves) can be freely adjusted. It does not simulate engine braking therefore in the project the engine braking part was developed and added to the model. Without it the car speed curves in the simulation were not matching the real car speed curves.

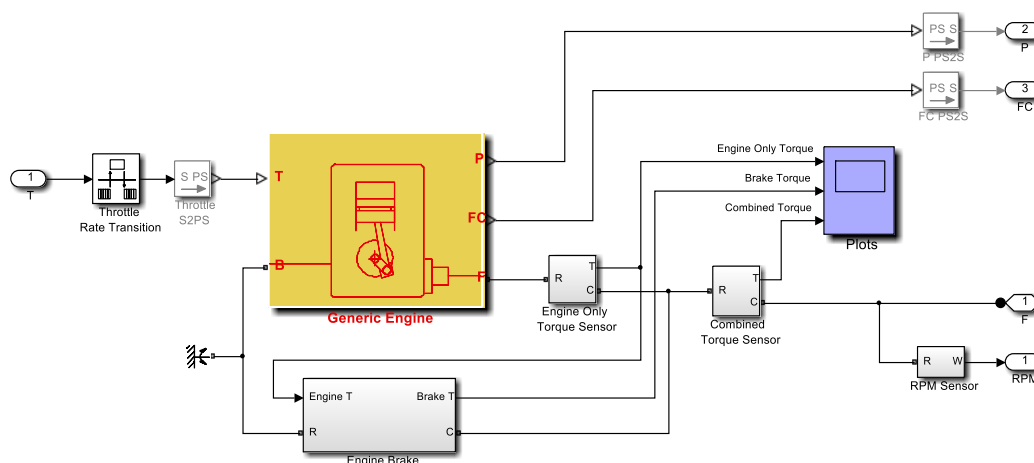


Figure 11 - Engine block in the Simulink Model.

At the moment this model does not simulate car fuel consumption although the model does support that. Instead the power delivered by the engine is measured and then the total used energy for the trip is computed.

The simulation of the fuel consumption requires measurements derived in dynamometer tests for a set of engine loads and at different RPMs. There is no other, simpler way to simulate fuel consumption of

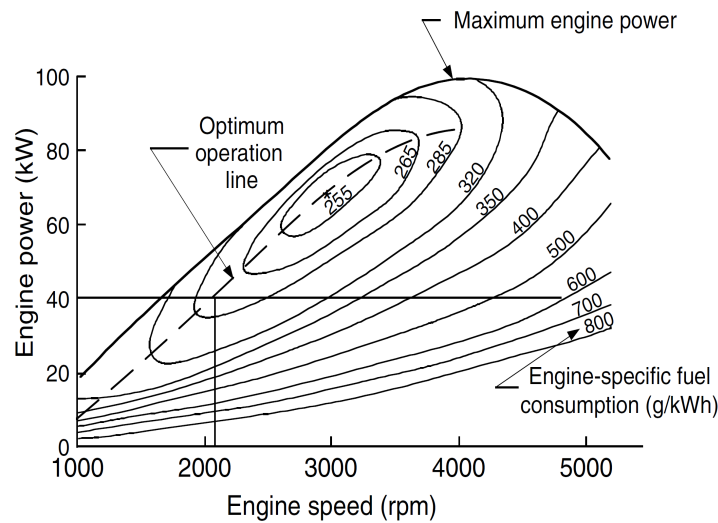


Figure 12 - Example on diagram showing fuel economy characteristics of a typical gasoline engine (Ehsani, Gao, Gay, & Emadi, 2004)

a modern car engine. Modern engines have several operation modes depending on the load and other factors. The operation modes differ between engine models and engine manufacturers.

In Figure 12 a sample of a brake specific fuel consumption (BSFC) map is shown for a gasoline engine. Similar maps must be obtained for each model of the cars that are used in the simulations.

8.2.2.1 Vehicle control block (basic autopilot version)

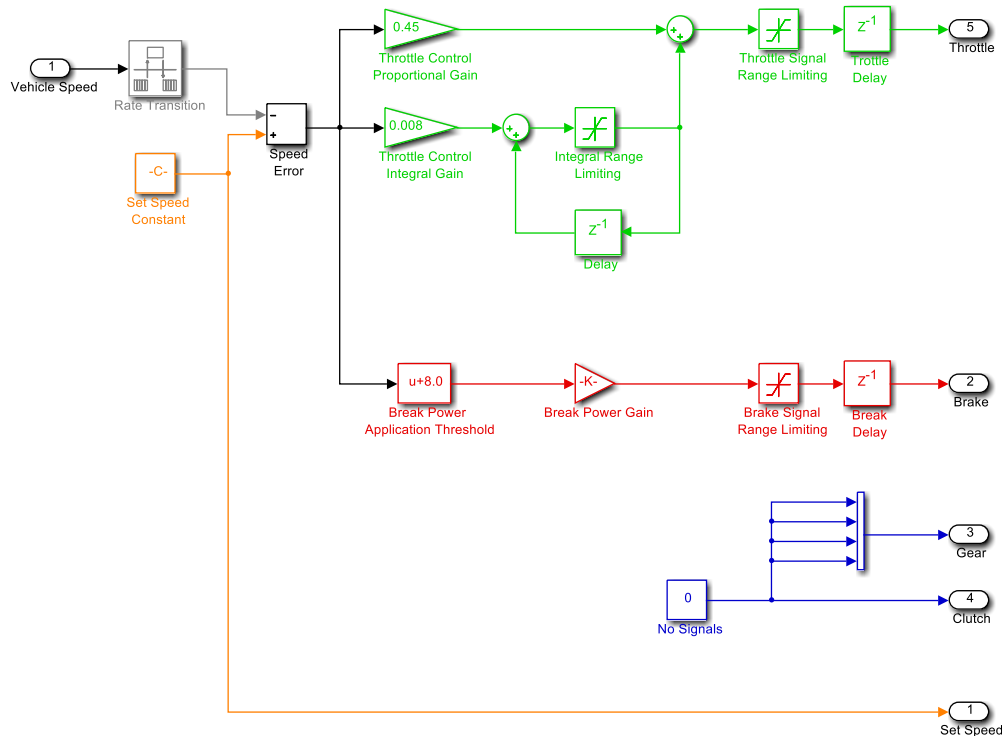


Figure 13 - Autopilot block in the Simulink model.

The autopilot block (the green block in Figure 6) is simulating not only the basic car speed autopilot, but it is also simulating the driver applying breaks in case the car is going too fast (when for example

the car is going downhill). This model will limit the car over speed to about 10 km/h comparing to the original target car speed. In the simulation carried out in the study the initial car speed is set to 55 km/h and the autopilot speed is set to 60 km/h. In the results the car speed is never exceeding 70 km/h due to use of car breaks.

8.2.2.2 Vehicle control block (manual control version)

For comparison of fuel savings we have used an alternative to the simple autopilot – a manual control method for the second car simulation model. In this model all other components of the simulation model are the same, except that the autopilot block is replaced with a block where all car controls are predefined manually. Several tests are done and the most fuel efficient control curve is selected. This way of speed optimization is very labor intensive and requires many simulation iterations. In view of current good results it was, however, decided to keep the current optimization level. Further fuel savings can be achieved by better tuning of car controls. Computation of the most optimal car speed (throttle value) would be the research and development task of the future intelligent GPS based autopilot.

8.2.3 Dual run model

A comparison setup was developed to compare the car with a regular autopilot (yellow blocks in Figure 14) and a car that saves energy using an intelligent autopilot (green blocks in Figure 14). The same road and the same start and environment conditions were used. Internally the two simulated cars use identical components described above with only one exception. The only difference is how the car speed is controlled.

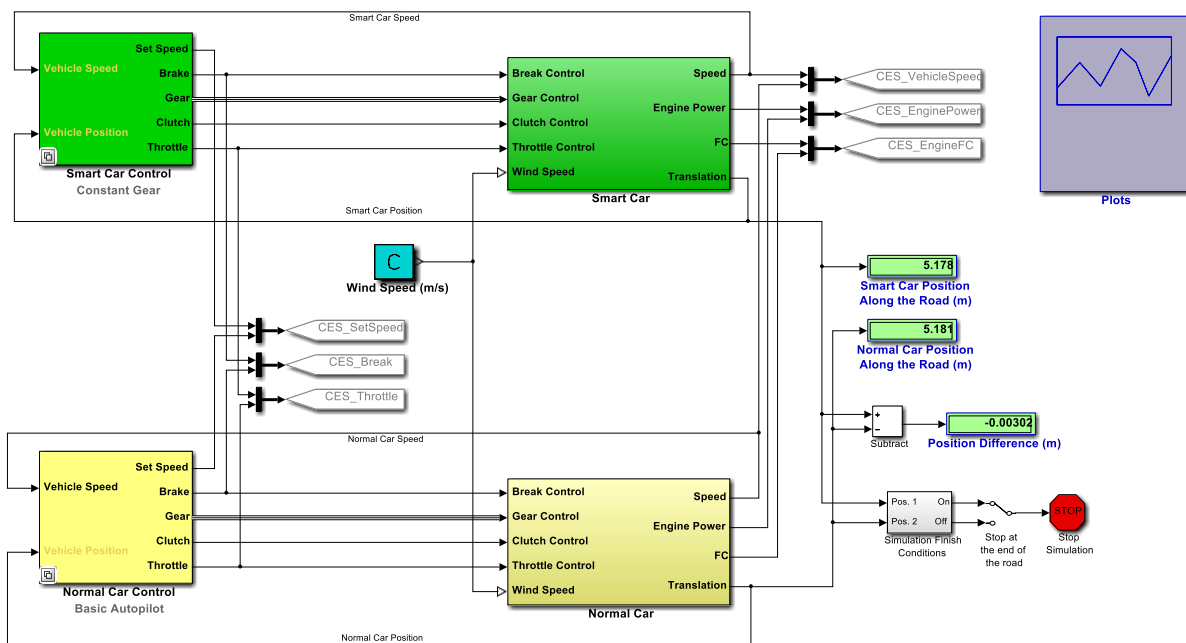


Figure 14 - Dual run set up. Yellow blocks refers to the use of a traditional autopilot. Green blocks refers to a manually control method simulating an energy efficient speed strategy.

One car has the speed controlled by a simple speed autopilot (as in regular car autopilots). The other car is controlled by manually optimized control curves. The control signals for this car are hand-optimized for the whole test road segment. The results obtained by this model are shown in the next section.

8.2.4 The simulation results

The simulation results are shown in the plots on Figure 16. The red line represents results from the car with a simple autopilot and the green line is for energy saving car. The results show that in our setup the smart car could save about 3-10% of energy in this particular road segment. Please note that here we talk about the energy that is delivered to the transmission, not the fuel energy (or fuel consumption). The fuel consumption should show even higher saving for this road segment as the internal combustion engines typically have energy efficiency ranging at about 10-30%. The losses are shown in the Figure 15 taken from (Heiðing & Ersoy, 2011).

The results clearly shows that the car with the regular autopilot was going too fast from the biggest hill and therefore the brakes had to be activated to keep the car speed within set limits. The energy saving car does not try so hard to maintain the set speed going uphill and therefore it does not need to use brakes going downhill.

The savings mostly come from relaxed speed (engine power) requests by the car controls when climbing uphill followed by an immediate downhill. This is very noticeable for the biggest hill in our test segment. The energy saving car is allowed to drop noticeably the speed before going downhill.

Note that the car with the simple autopilot arrives at the end of the road a few seconds earlier than the other car. This causes it to travel a bit past the end of the test road until the simulation is stopped.

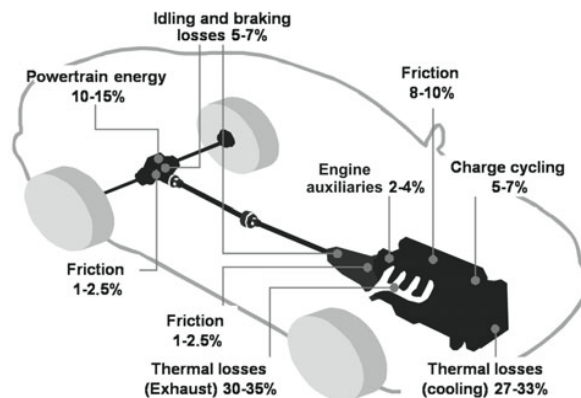


Figure 15 - Passenger car powertrain losses.

The current model still needs some calibration and also verification regarding engine braking power, transmission losses and the autopilot operation.

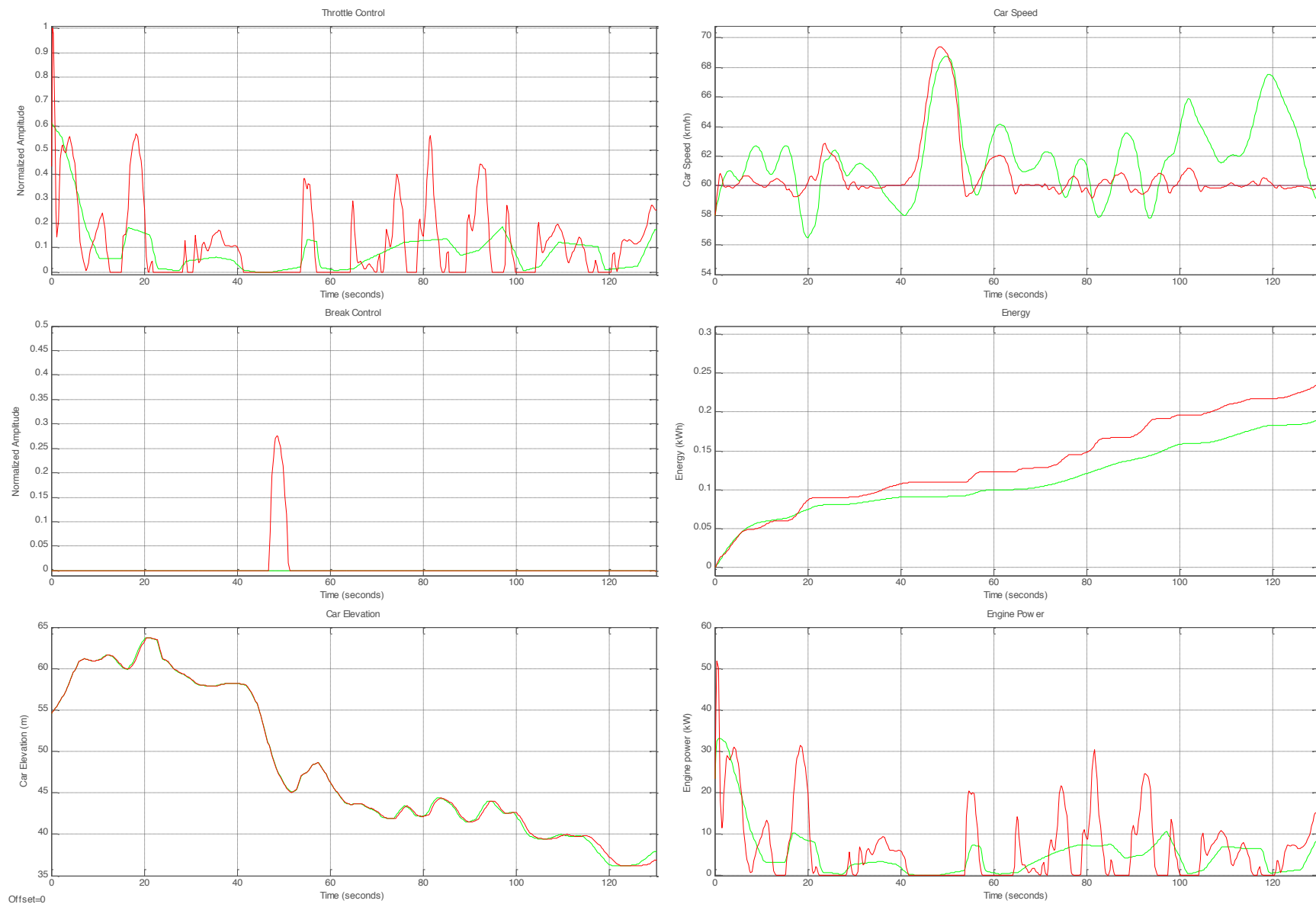


Figure 16 - Results from dual run model. Red line refers to an traditional autopilot. Green line refers to an energy efficient speed strategy approach.

9 Foranalyse af metode til overførsel af højdeinformation fra den danske højdemodel til eksisterende plane vejnetsdata.

9.1 Formål

Udviklingen af intelligente transportsystemer accelererer i disse år. Det intelligente indhold består både af teknikker og metoder, og kan inden for vejnet-baserede systemer, anvendes til at forbedre enten personsikkerhed eller ressourceforbrug, hvortil der findes mange eksempler. Intelligent farttilpasning er en blandt flere af disse metoder, og kan ligeledes tænkes i både en sikkerhedsmæssig anvendelse og i en ressourcebesparende anvendelse – uden at de er gensidig udelukkende.

Autonomous/adaptive cruise control består af systemer der bygger på forskellige sensorer, som opfanget og afkoder anden trafik eller fysiske forhindringer for derved at assistere i kørslen. Systemerne har typisk haft fokus på et trafiksikkerhedsmæssigt aspekt, det være sig assistance til bakning, parkering, bremsning etc.

Netværksbaserede systemer som ruteoptimering og ruteplanlægning beskrives normalt i et 2-dimensionelt rum, af mange gode årsager, hvorfor højden, den 3. dimension, normalt ikke er inddraget. Men Principielt befinder sådanne transportsystemer sig i et tredimensionelt geografisk rum hvor højden, hældningen, krumningen, vinklen osv. har betydning for transportens afvikling.

I takt med fremkomsten af nye data og bedre systemer, kan og bør denne inddragelse gentænkes. Konkret kan det indtænkes i systemer der advarer mod dårlig sigtbarhed som ved bakketoppe og sving, men det kan også indtænkes i systemer der via hastighedsreguleringer overvinder højdeforskelle mest effektive, set i enten en brændstof-rationel eller en tids-rationel betragtning.

Derfor undersøges det hvorledes højdedata kan anvendes til at forædle eksisterende netværksdata.

Dette skal også ses i lyset af den udvikling de såkaldt *frie grunddata* (Geodatastyrelsen, 2013) repræsenterer i Danmark.

9.2 Data

9.2.1 Frie grunddata

Danmark er langt fremme med hensyn til konstruktion og distribution af geografiske grunddata, herunder højdedata. Disse blev frikøbt pr. 1.1.2013 fra offentlig side, hvorefter alle kan anvende de yderst detaljerede data omkostningsfrit. Der er tale om en ret unik situation, hvor nogle af de mest komplette og præcise landsdækkende højde data der findes, tilbydes kvit og frit. Dette er endnu en god grund til at beskæftige sig med dette emne.

Grunddataprogrammet (Digitaliseringsstyrelsen, 2012) er et offentligt program der både skal bidrage til effektivisering, modernisering og bedre forvaltning i den offentlige sektor, samt øget vækst og produktivitet i den private sektor.

Frem til og med 2016 er Staten i gang med at rydde op i, og forbedre, flere registre med centrale offentlige data. Samtidig med oprydningen bliver data gjort frie og gratis tilgængelig for alle – også

virksomheder og borgere. Data om ejendomme, adresser, virksomheder og vandforvaltning er områder hvor data frisættes. Endvidere gives der fri adgang til frie geodata (Geodatastyrelsen, n.d.-a) som:

- Danmarks Højde Model
- Grundlæggende landkortdata (FOT)
- Klimaplaner
- Landinddelinger
- Matrikeldata
- Stednavne
- Topografiske Kort

Der er etableret en fælles distribution af grunddata gennem en fælles offentlig infrastrukturkomponent, der sikrer en effektiv distribution af grunddata. I denne analyse inddrages vejnet samt højdedata fra distributionen.

9.2.2 Den Danske Højdemodel (DHM)

For at kunne vurdere anvendeligheden af den eksisterende højdemodel, er det nødvendigt at beskrive selve produktet mere indgående.

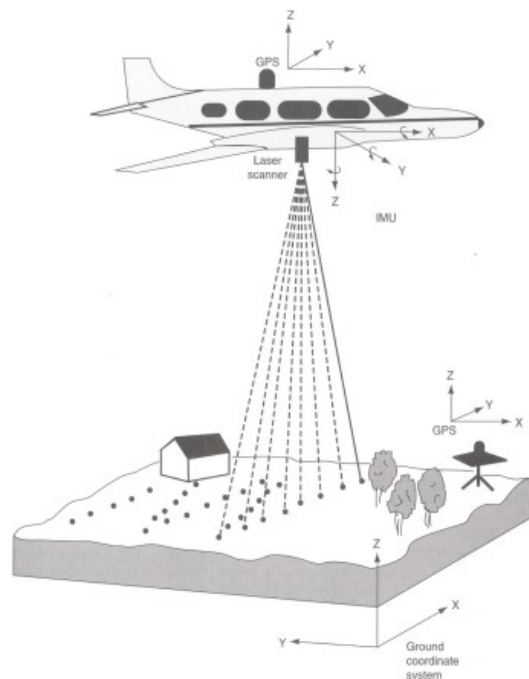
Der findes principielt to forskellige højdemodeller, en model der beskriver jordens overflade; terrænmodel (*terrainmodel*), og en model der beskriver den fysiske overflade; en overflademodel (*surface-model*).

En terrænmodel er med andre ord en model for terrænet rensset for både menneskeskabte objekter som broer, veje og bygninger, og for naturlige biologiske objekter som træer og anden bevoksning. Det er altså en beskrivelse af hvor terrænet *ville være* hvis der ikke var bygget noget, eller der ikke voksede noget.

Overflademodellen består dermed af den egentlige fysisk lokaliserbare overflade, inklusive bygninger og vegetation.

Den danske højdemodel blev samfinansieret af Miljøministeriet, Transportministeriet, Klima- og energiministeriet samt Forsvarsministeriet. I perioden 2005-2007 opmåledes landet ved hjælp af flybåren laserscanning⁶, fra 2007-2009 forædledes og kvalitetskontrolleredes data og pr. 1.1.2013 blev disse data så frit tilgængelige. I skrivende stund er et nyt udbud på vej, således informationerne kan opdateres, men principielt er der tale om målinger udført i perioden 2005-2007.

⁶ LIDAR: Light Detection and Ranging



Figur 17 Laserscanning

Opmålingen foregår ved at en laserimpuls reflekteres af objekter på jorden, og returneres til den pågældende modtager, hvorefter afstanden til objektet kan beregnes sammen med den specifikke placering. I modsætning til eksempelvis GPS-baserede opmålinger er laser-scanninger karakteriseret ved at den vertikale nøjagtighed er bedre end den horisontale. Forestiller man sig et træ, vil der komme impulser tilbage fra både selve træet/trætoppen samt fra jorden under træet.

De opsamlede punkter klassificeres til enten terræn eller overflade. For det meste automatisk, men i tilfælde hvor eksempelvis fugleflokke kommer imellem flyver og terrænet, kan der være behov for manuelle tilrettelser.

Ud fra disse klassificerede punkter skabes følgende produkter (Geodatastyrelsen, 2012).

1. DHM/punktsky
Punktskyen er det produkt hvorfra de andre afledes. Punktskyen er de behandlede LIDAR⁷-scannede punkter, hvis antal og kvalitet varierer kraftigt i forhold til den målte overflades beskaffenhed. I gennemsnit er der 0,5 pkt/m² i Danmark.
2. DHM/Terræn
Dette af punktskyen afledte tema, og fejlrettet efterfølgende, er principielt en beskrivelse af terrænet uden objekter som bygninger, halmballer, biler, skove, træer etc.
3. DHM/Overflade
Dette er også afledt af punktskyen med tilhørende rettelser, men er i stedet en beskrivelse af overfladen, dvs. bygninger og bevoksninger er med i denne model.
4. DHM/Terræn_bro
Broer over veje er trukket ud i et særkilt tema.

⁷ Light Detection and Ranging.

5. DHM/Højdekurver

Konturlinjer der automatisk er genererede på baggrund af DHM/terræn, og findes med en ækvidistance på 0,5 meter.

Specifikke anvendelsesområder for en digital højdemodel kan være:

- Fysisk planlægning
- 3D visualisering
- Støjmodellering
- Modellering af sigt- og vindforhold
- Landskabsanalyse
- Oversvømmelseskortlægning/screening
- Katastrofebredskab
- Risikovurdering af veje (ekstrem regn)
- Habitatovervågning
- Kontrol af hektarstøtte udbetalinger
- Forvaltning af skovressourcer
- Retningsbestemmelse af vandløb

Terrænmodellens absolutte nøjagtighed i højden er estimeret ud fra 162 reference arealer (Brigitte & Frederiksen, 2011), der er opmålt med GPS RTK udstyr. På hvert areal er der opmålt ca. 100 punkter og afvigelserne mellem model og GPS-målingerne er beregnet. Referencearealerne er primært flade græsbevoksede arealer.

Nøjagtigheden er nedenfor udtrykt som RMSE⁸:

- Maksimum 19,8 cm
- Minimum 1,5 cm
- Middel 5,9 cm
- Standardafvigelse 3,44 cm

Ved konstruktion af højdemodellen, er data korrigeret ved hjælp af vejmidter fra Kort10, hvor alle punkter mellem terræn og 4 meter over terræn er udeladt fra DHM/Overflade beregningen. Dette er gjort for at fjerne signaler fra temporære objekter (typisk biler/busser), og samtidig bevares signaler fra alle træers toppe over 4 meter, skilteportaler mm.

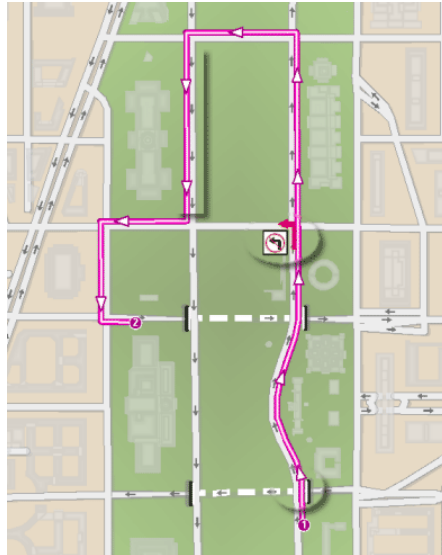
Ovenstående nøjagtighed er ganske givet udmærket i forhold til den anvendelse som er skitseret i indledningen, hvor det er væsentlig større højdeændringer der skal til for at udløse hastighedsændringer i køretøjet.

9.2.3 Vejnet

Netværksdata der anvendes til ruteoptimering består af et linje-baseret netværk, hvortil der er knyttet en lang række oplysninger som adresser, stednavne og vejnavne, men også en særlig type af geometriske informationer der knytter sig til hvorledes man kan bevæge sig i netværket; hvilke knuder er forbundne, hvordan kører man i rundkørsler, etc. Den såkaldte netværks-topologi. Sådanne datasæt er med tiden blevet så komplekse og omkostningsfulde at skabe og særligt ajourføre, at der i dag eksisterer ganske få firmaer som leverer disse netværk, der samtidig har en global dækningsgrad.

⁸ Root Mean Square Error

Et netværksdatasæt består altså af både linjer, punkter og attributter. Linjer beskriver vejens geometri, punkterne beskriver steder på linjen hvor der kan foretages en handling som en afkørsel, vending osv., mens der i en tilhørende database kan være information om hvilke veje er ensrettede, hvor stærkt må man køre, hvor megen trafik er der typisk, hvad er husnummeret⁹ osv.



Figur 18 Illustration af et netværk (ArcGIS)

Vejnettet der anvendes i denne analyse, er udelukkende det vejnet der kan tænkes at indgå i konstruktionen af et topologi-baseret netværk, og derfor er det hensigtsmæssigt at anvende et vejnet der er en del af de frie grunddata, idet det kan anvendes til en eventuel netværksopbygning, men skal der evt. anvendes andre temaer eller andre vejnet, er disse metodiske overvejelser stadig gyldige, og kan indgå i andre produkter.

Det anvendte vejnet er en del af det topografiske grundkort der benævnes for Kort10 (Geodatastyrelsen, n.d.-b). Kort10 er inddelt i 7 overordnede klasser:

- Bygninger
- Bebyggelse
- Trafik
- Teknik
- Natur
- Hydro
- Administrativ

⁹ Typisk vil et adressepunkt der principielt ligger i en bygning, 'flyttes' ned på vejen ortogonalt projiceret ift. vej-forløbet.

Klassen med Trafik indeholder under-klasserne

- Vejmidte
- Jernbane
- Systemlinje
- Vejkant
- Helle
- Chikane
- Trafikhegn
- Standsningssted

Vejmidte er temaet der anvendes i dette projekt. Det er veje der er beregnet til almindelig motoriseret færdsel, og indeholder en bred vifte af mulig relevant information:

- Oplysninger om vejmyndigheden samt vejkode.
- *Vejklasse* (eks. gennemfartsvej, lokalvej eller indkørselsvej)
- Trafikart (eks. motorvej, motortrafikvej eller redningssluse)
- Niveau (Bro, tunnel)
- Overflade (befæstet, ubefæstet)
- Vejbredden i intervaller

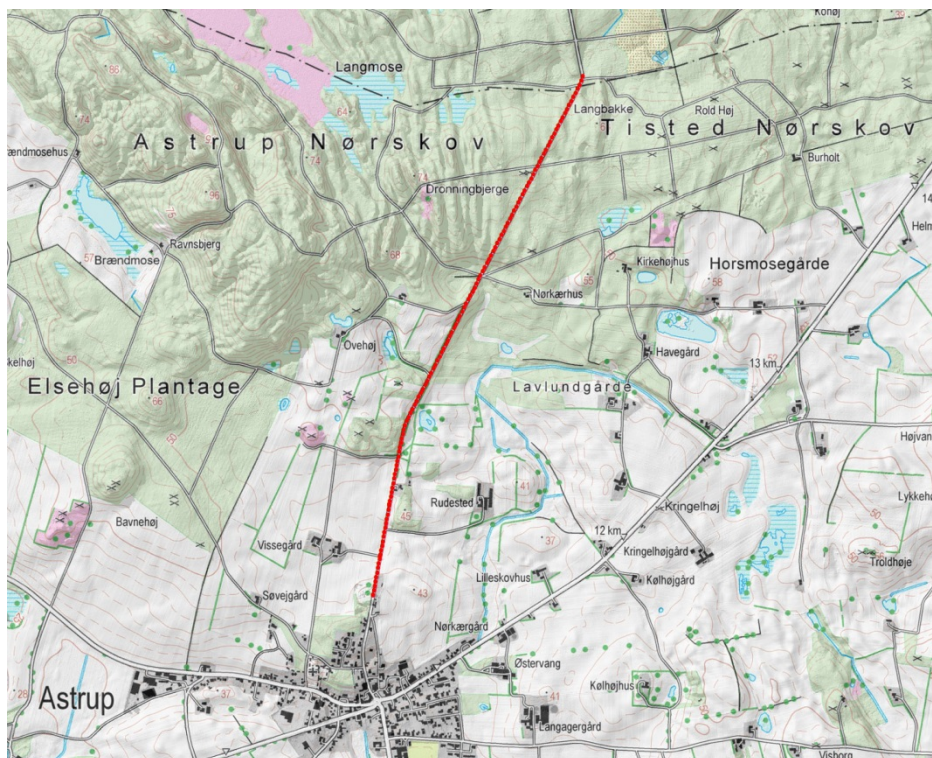
Den geometriske nøjagtighed af vejmidterne er væsentlig bedre end GPS positioneringsteknikkernes nøjagtighed, og udgør derfor ikke noget problem i denne sammenhæng.

9.3 Analyse

I den første del af analysen vurderes om informationerne i Danmarks Højde Model har en nøjagtighed der gør dem egnede til projektets anvendelse med fokus på brændstofoptimering, og samtidig vurderes hvilke af produkterne DHM består af, der er bedst egnede. Denne del analyserer hvorledes højdeinformation overføres til et punktbaseret tema

I anden del af analysen undersøges hvorledes den samme højdeinformation kan overføres til et linje-baseret tema, som en konkret hastighedsoptimeret løsning under alle omstændigheder skal indeholde.

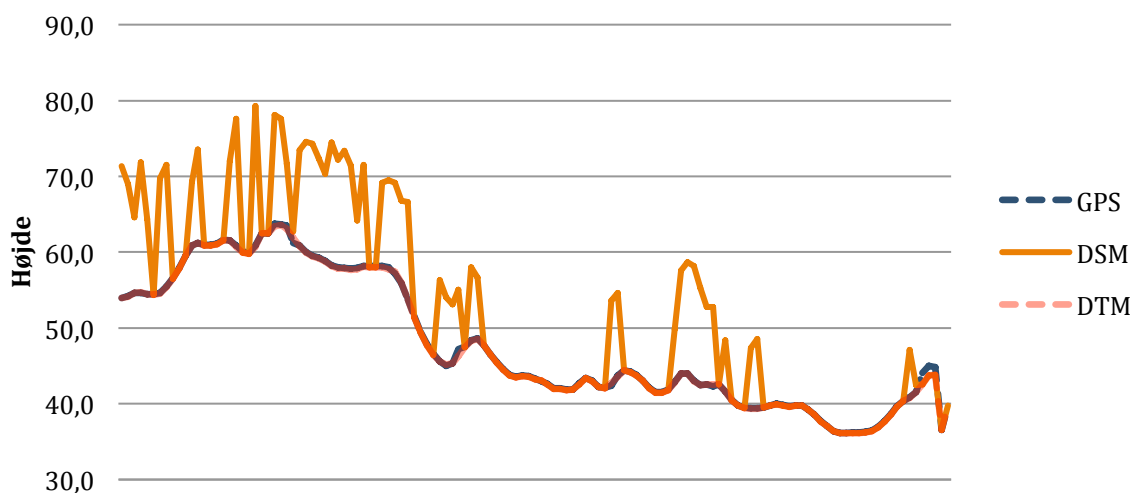
Som input til første del af analysen, er modtaget en fil indeholdende 131 punkter med højde, dækkende et vej-forløb på knap 1,7 km. et par km. sydøst for Madum Sø i Nordjylland. Denne opmåling er foretaget med præcisions GPS udstyr, der gør det rimeligt at antage at disse opmålinger beskriver den *korrekte* placering. Derfor anvendes disse som test af højdemodellens validitet til det påtænkte formål.



Figur 19 Den anvendte strækning.

I figuren ses udover selve vejstrækningen med rødt, som punkterne dækker, et topografisk kort som baggrund og en såkaldt *hillshade* der viser højdemæssige variationer med en skyggeeffekt.

Principielt bør både terræn- og overflademodellen fra DHM beskrive et vejforløb, idet der ikke er bygninger – andet end broer – der ligger på vejene. Derfor er disse produkter testet med henblik på overførsel af højde-information. Via funktionen *add surface information* er højderne overført til det eksisterende GPS-indmålte punkt-tema – der altså repræsenterer et vejstykke, da de er målt i bil. At overføre højden fra en cellebaseret højdemodel er ganske enkel, idet punktet blot antager værdien, som den underliggende celle har. Det er resultatet af denne funktion der ses her.

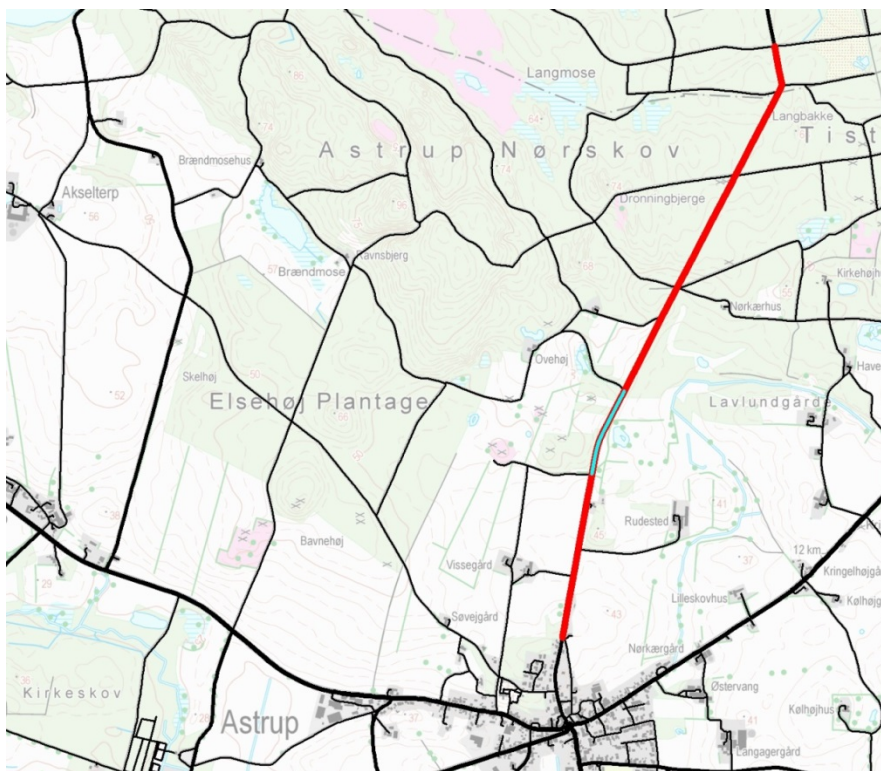


Figur 20 Et vejstykkets højde målt fra DSM henholdsvis GPS.

Det ses tydeligt at højden fra DTM-modellen ligger ganske tæt på den målte GPS-højde, hvorimod DSM-modellen fluktuerer ganske meget. Derfor kan højdeinformation overført fra overflade-modellen fraskrives som en mulighed, hvor imod alt tyder på, at terræn-modellen ret præcist beskriver den virkelige højde, under forudsætning af GPS målingen viser dette – og der derfor er grund til at antage at deres præcision er udmærket til det tænkte formål.

Den gennemsnitlige afvigelse på DTM'en i forhold til GPS-punkterne er på 8,5 cm., og det skyldes primært en 50 cm afvigelse i slutningen af forløbet – ellers ligger punkternes højde inden for ganske få cm. Sandsynligheden for at både GPS-målingen og de DTM-baserede udregninger skulle være *lige* forkerte, må anses for at være lig nul.

Det viste sig dog, at 50 af punkterne fra DSM'en og GPS-punkterne havde en difference på mellem 6 og 18 meter, og altid med overflade-modellen som den højeste. Det skyldes efter al sandsynlighed at bevoksningen, her træer som det også ses af topografien i figur 19, går ind over vejen, eller mere korrekt, fylder nogle af de 1,6 meter celler¹⁰ som vejen krydser på *sin vej*.



Figur 21 Test-strækningen samt vejmidter fra Kort10.

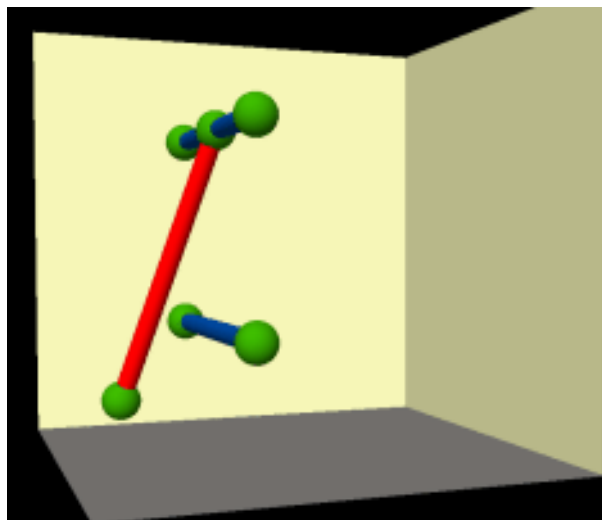
Efter således at have konkluderet det er terrænmodellen (DTM) der er anvendelig, og samtidig konkluderet at kvaliteten er tilstrækkelig til de påtænkte funktioner, skal det undersøges hvorledes højden kan overføres til linjer, idet de typisk vil indgå i et topologibaseret netværkstema, i stedet for de punkter der repræsenterede GPS målingerne.

¹⁰ Højdemodellens cellestørrelse.

9.4 Vejnet med højde

Når fysiske objekter skal modelleres i et Geografisk Informations System, opererer man med to grundlæggende typer; raster og vektor, hvor raster kan opfattes som billeder og vektorer som matematiske beskrivelser bestående af principielt tre forskellige typer, nemlig punkt, linje og polygon. Veje repræsenteres nærmest udelukkende som vektorer af indlysende årsager, og næsten udelukkende som plane to-dimensionelle linjer. Således også for det i undersøgelsen valgte tema, vejnet fra Kort10.

Der er derfor ikke tale om nogen oplagt løsning på, hvorledes 3D informationen skal lagres, og særlig ikke når det endelige produkt ikke er kendt og beskrevet. Men alligevel, eller måske netop derfor, er det væsentlig at se mere indgående på, hvilke muligheder der umiddelbart eksisterer.



Figur 22 Illustration af et 3D netværk (ArcGIS)

Eksempler på anvendelser der bygger på 3D-linjer:

- Underjordiske transportsystemer
- Flykorridorer
- Sigtelinjer mellem bygninger
- Transportnetværk i høje bygninger

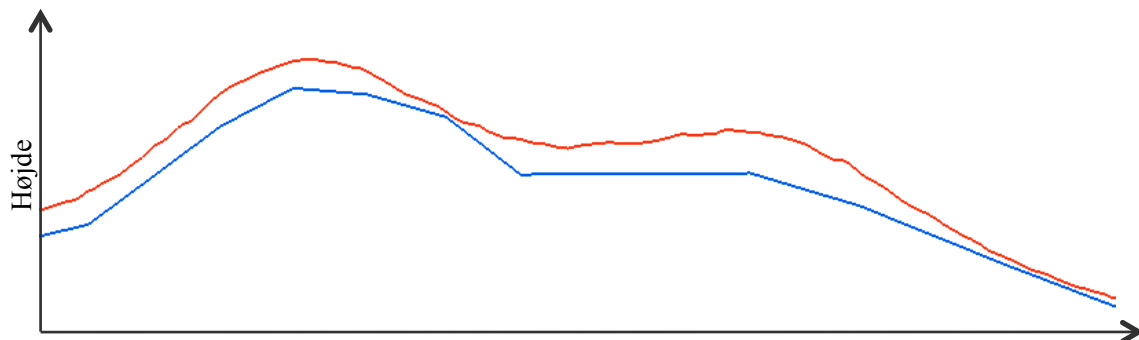
Vejene er modelleret som henholdsvis geometri og tilhørende egenskabsdata eller attributter. Derfor er der også principielt to måder hvorpå den overførte højdeinformationen kan lagres på; som en attribut der knytter sig til et specifikt linjestykke, og som en geometrisk 3-dimensional beskrivelse der ligeledes knytter sig til selve linjestykket. Anbefalingen er traditionelt, at linjer der følger jordens overflade bør modelleres som 2D linjer af effektivitetshensyn, både med hensyn til datalagring, bearbejdning og ajourførelse.

Der findes to geoprocesseringsværktøjer der kan overføre 3D information fra en terrænmodel til et eksisterende 2D tema – som her vej-temaet fra Kort10.

- *Interpolate Shape*
Interpolerer højden fra en overflade, og overfører denne information til selve geometrien
- *Add Surface Information*
Interpolerer højden fra en overflade og overfører til det pågældende tema som en attribut. Det-

te betyder at et linjestykke på eksempelvis 200 meter kun har to højder tilknyttet, i start og i slutpunktet.

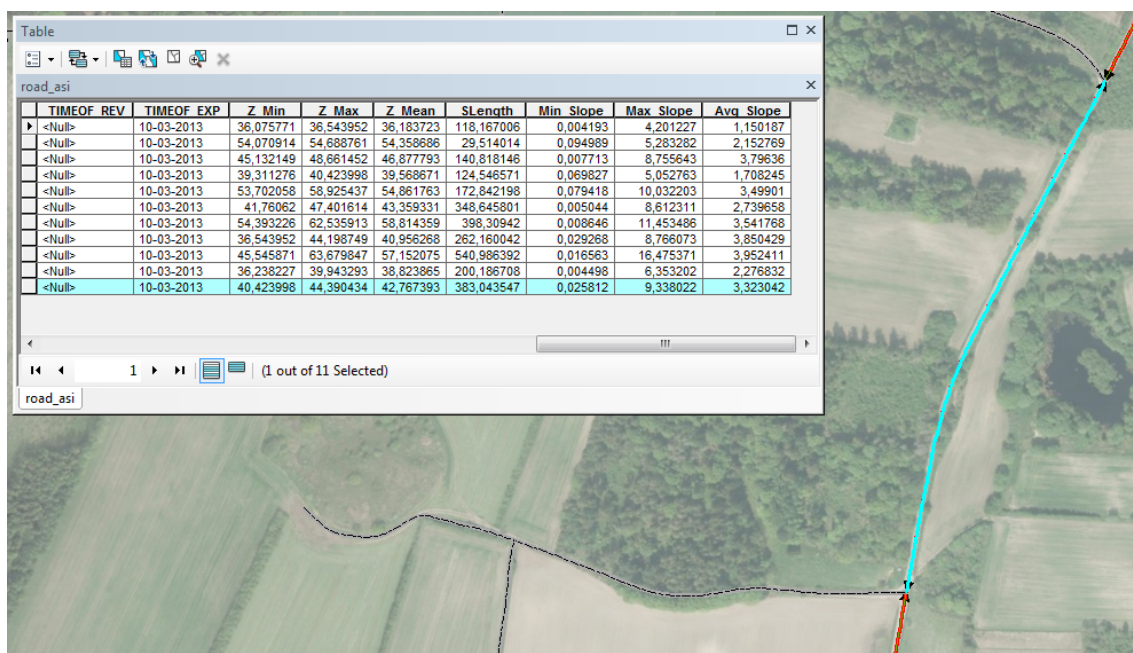
Der er ganske vist tale om to specifikke funktioner i et specifikt program, men de repræsenterer to forskellige metoder til overførsel af 3D information til 2D der nødvendigvis vil gå igen i andre.



Figur 23 *Interpolate shape* med rødt og *add surface information* med blåt.

Som det ses af ovenstående figur, der viser det samme vejstykke med overført 3D information, er det blå stykke karakteriseret af direkte linjer mellem hvert endepunkt, hvorimod det røde stykke har 3D information til hvert mellempunkt også, og derfor repræsenterer højden kvalitativt bedre end det blå. Det vil dog altid være op til en konkret afvejning hvilken funktion, der er den optimale.

Følgende figur viser, hvilke yderligere informationer der bliver knyttet til et linjestykke som attributter, efter anvendelsen af funktioner der overfører højdedata til linjerne.



Figur 24 Informationer knyttet til et 3D-linjetema.

Der ses hvorledes data om hældning, maks. højde mm. indskrives, men det er stadig gældende, at det er for det enkelte linjestykke, hvis udstrækning derfor kan dække over flere dale og toppe, som følgende figur skal illustrere.



Figur 25 Højdeprofilen på et enkelt linjestykke fra Kort10's vejmidte-tema.

Det er tydeligt at selve vejstykket skal modelleres på en anden måde, hvis de enkelte bakketoppe og dale skal anvendes i en ressourcebesparende hastighedsregulering. Men det er ligeså tydeligt at de nødvendige data er tilgængelige.

9.5 Konklusion og perspektivering

Som afslutning ses der på hvilken betydning eventuelle implementeringsmæssige beslutninger kan have på de valg, der må træffes og anbefalinger til disse.

Det programmatisk interface til et beregningsmodul vil også være medbestemmende for valg af metode til overførsel af højdeinformation til vejnettet. Dette modul er stadig på konceptniveau, hvorfor denne analyse indeholder flere metodeforslag, og samtidig fastholder fokus på den konceptuelle modellering.

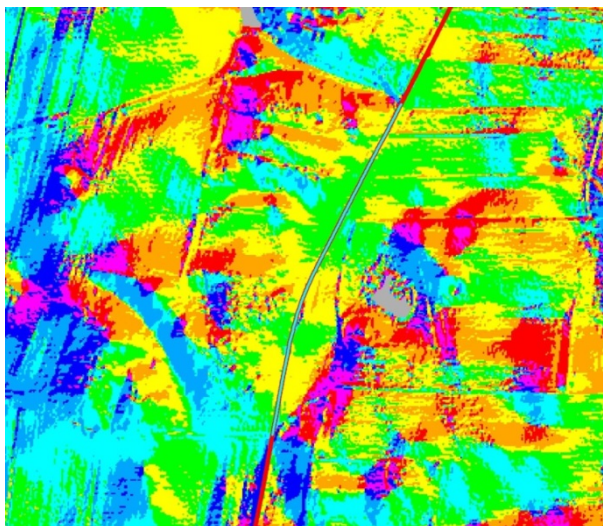
I en konkret driftsfase vil det være nødvendigt at inddrage det DHM produkt der indeholder broer, og ved mere komplekse beregninger finde ud af hvilken vej der går over denne. En proces der med stor sandsynlighed kan foretages med afsæt i at se på de pågældende vejes højde (som overført fra DHM/terræn) lige før broen.

En afgørende beslutning for implementeringen vil være valg af teknologi. Skal det være muligt at lave realtids-beregninger, eller er beregningerne forudset således, at beregninger kan være foretaget og overført til et vejnet, så informationen ligger til det enkelte vejstykke som en attribut.

En konkret test vil være nødvendig for at afprøve, hvorvidt beregningshastigheden vil være acceptabel. Dette afhænger af processorkraften, og hvorvidt det er en standard GPS eller en SmartPhone der anvendes som teknologi?

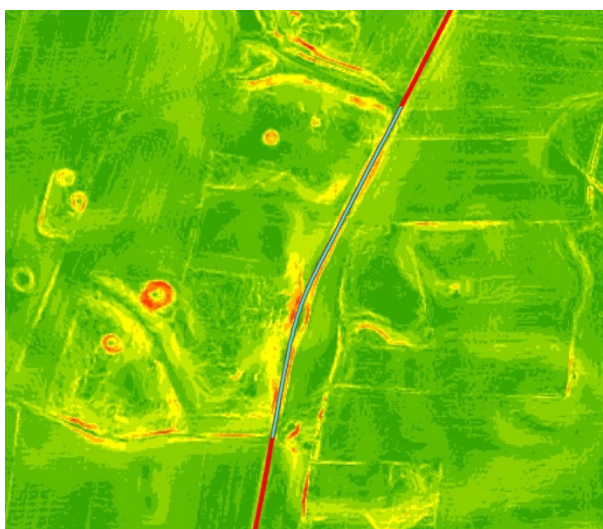
Et implementeret system kan også tænkes benytte en trådløs forbindelse til eksterne datasæt og processeringsressourcer, hvilket igen vil have indflydelse på, hvor mange og hvilke analyser der skal være foretaget før kørslen, og hvor mange der kan foretages under kørslen i realtid.

Der findes afledte produkter af en DHM som et retningskort, der ses i følgende figur.



Figur 26 Hældnings-retningskort.

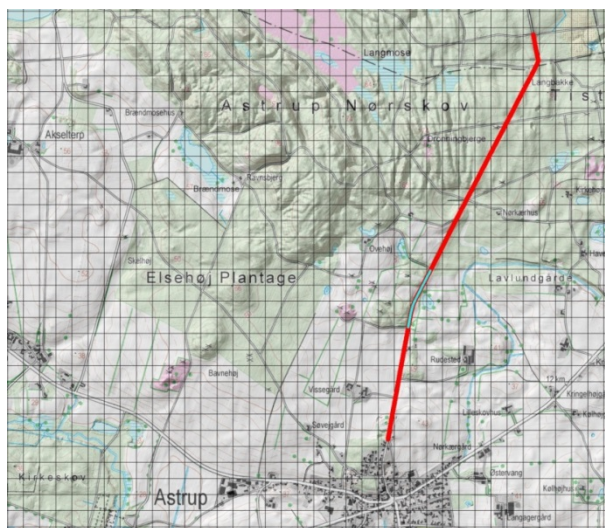
Ved kobling af tidspunkt og årstid med ovenstående hældningskort kunne man lave et system der indikerer sandsynligheden for blanding, evt. kombineret med en lysmåler.



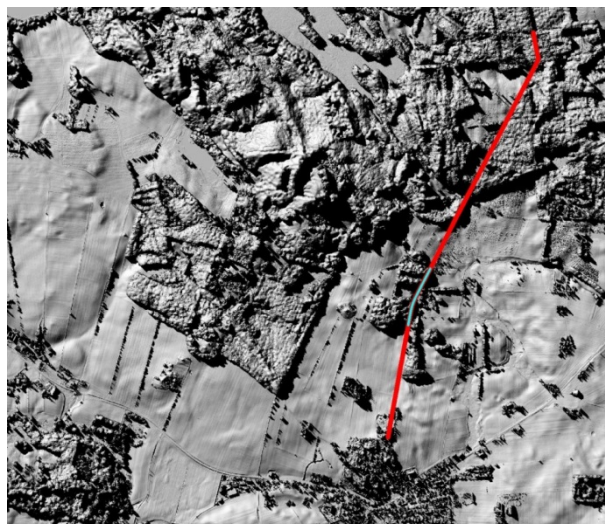
Figur 27 Hældningskort

Et andet afledt produkt er et hældningskort til hastighedsoptimeringen, der viser hældningen i et bestemt sted på vejen i sammenhæng med bakker og dale.

En mulighed for at lave en *smart* beregning under skabelse af datasættet, kan være at opdele vejstykkerne i mindre stykker – eventuelt skære dem over vha. celler som vist i figur 28, således der kun kan være en top eller en bund i hvert vejstykke.

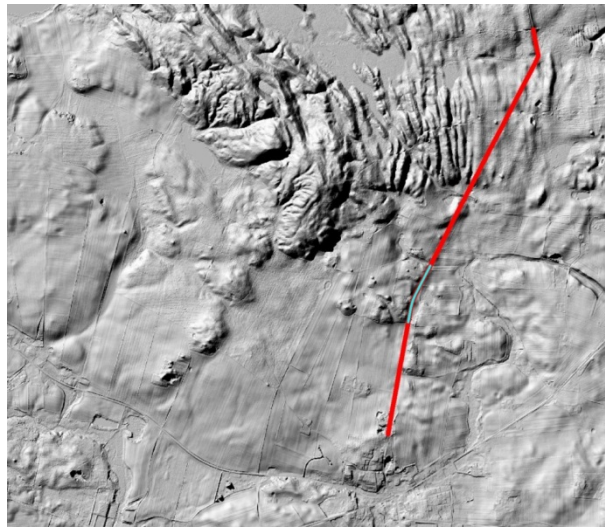


Figur 28 Opdeling af vejmidter i mindre vejstykker.



Figur 29 Overflademodellen for testområdet.

Ved at kaste et blik på ovenstående figur, dukker en mulighed naturlig op for at advare mod sving med dårlig oversigtsforhold, eller t-kryds hvor den udkørende trafik har dårlige oversigtsforhold.



Figur 30 Terrænmodellen for testområdet.

10 Konklusion

Projektet har på mange måder være meget lærerigt. Både med hensyn til at skabe forståelse for den bagvedliggende teori i sammenhæng med den fysiske forståelse for køretøjets bevægelse, og med hensyn til potentialet for brændstofbesparelsen ved at lade vejens vertikale forløb indgå som en forudsigelig størrelse, hvorved en mere hensigtsmæssig fartgivning kan opnås.

Størrelsen på besparelsen varierer meget i både litteraturen og i vores egne undersøgelser, men selv de resultater, der påviste den laveste opnåelige besparelse giver anledning til at arbejde videre med udviklingen af en fartpilot, hvor vejens tracé indgår. For selv under forhold hvor vejens geometri kun i ringe grad varierer er der et klart potentiale for besparelser. Selv en enkelt bakke over et længere stræk bonner tydeligt ind på benzinforbruget, hvis ikke den tilgås på den rigtige måde med hensyn til fartgivningen. Der er ingen tvivl om, at en person, som kører meget bevidst med hensyn til vejens tracé, vil kunne opnå lignende resultater, men det er næsten umuligt at gøre over længere tid. Derfor skal denne del indbygges i en fartpilot. En fortsættelse af projektet vil som output kunne generere de nødvendige algoritmer og grunddata for, at man i Danmark vil kunne indføre en generel energieffektiv kørsel. Vores samarbejdspartner Dancar vil selvfølgelig kunne levere en løsning til alle køretøjer, der ingen fartpilot har, og en åben adgang til udviklingsresultaterne og et krav om indførelse af energieffektiv kørsel vil give alle andre kommercielle produkter muligheden for at indføre tilsvarende løsninger.

Der eksisterer et stort antal kombinationer af gearkasser og køretøjer, hvilket på den ene side har indflydelse på besparelsen, men på den anden side vil være meget vanskeligt at styre via en fartpilot og dermed optimere med hensyn til mulig reduktion af forbruget. Den bedste løsning, hvor en fartpilot indgår, fås ved anvendelsen af et automatgear, der også bør være optimeret med hensyn til energieffektiv kørsel, hvilket flere og flere er. Dette ses af, at et automatgear traditionelt bruger mere brændstof end samme køretøj med manuelt gear. Et moderne automatgear især i mindre biler benytter i dag ofte et mekanisk gearskifte frem for et hydraulisk, hvilket er mere energibesparende i sig selv. Og selv de hydrauliske, som grundlæggende benytter mere energi end mekaniske kan opnå besparelser sammenlignet med et manuelt gearskifte pga. et optimeret gearskifte i relation til omdrejningstal og trækmoment. Manuelt trækkes gearret ofte for langt og der skiftes for sent eller slet ikke. Når køretøjerne stadigvæk bruger mere energi med automatgear skyldes det mest af alt, at disse er optimeret med hensyn til kørekomforten og ikke benzinforbruget. De store tyske bilproducenter har adskillige modeller på markedet, hvor benzinforbruget ved automatgear er lavere end deres manuelle pendant uden tab af komfort. Med et fortsat fokus på at reducere forbruget, vil vi fremover se flere automatgear, som er mindre forbrugende end ved manuel gearskift alene ved at eliminere den menneskelige faktor ved gearskiftet. Elbiler og hybridbiler er typisk med automatgear og fås ikke med andet, hvilket også klart indikerer, hvad et automatgear kan, hvis man ønsker det.

Nogle andre faktorer som spiller ind på køretøjets forbrug er hhv. dækkenes rullemodstand og ikke mindst vindpåvirkningen. Sidstnævnte vil vi ikke kunne gøre meget ved. Bevæger man sig fra A til B er vejen oftest givet ikke mindst retningen for turen. Et køretøj kan ikke krydse op imod vinden som et skib og udnytte fysiske forhold i aerodynamikken for at opnå en bedre økonomi. Mindre ændringer i udformningen, hvor der tages hensyn til hhv. medvind og modvind vil måske kunne give en besparelse, men det vil være udenfor en fartpilots rækkevidde. Således vil rullemodstanden også kun vanske-

ligt kunne indgå i et fartpilotsystem. Generelt er køretøjet en stor og vanskelig faktor at inddrage i fartpiloten, idet denne varierer fra køretøj til køretøj og ikke mindst under kørslen. Men med den tilgang vi har til systemet, er det måske mindre betydende, idet vi tager udgangspunkt i den momentane position og hastighed og forsøger at optimere den lokalt. Selve kørslen vil så kunne indgå, som en form for løbende kalibrering, idet skiftende ydre påvirkninger hele tiden vil spille ind på en optimal fartgivning, men hvis betydning vil kunne reduceres ved løbende justeringer. For at dette skal kunne virke bedst muligt, er det nok ikke uvæsentligt, at det ikke kræver alt for mange oplysninger fra andre sensorer, end dem der kan tilgås via OBD systemet i køretøjet.

En anden væsentlig forudsætning for en realistisk udvikling af en energieffektiv fartpilot var forudsætningen om et godt kortgrundlag. Vi har her i projektet dokumenteret, at kortgrundlaget ikke blot er til stede, men har en kvalitet, som overgår, hvad man generelt finder på markedet i et internationalt perspektiv. En fremtidig udvikling af en fartpilot vil således kunne benytte et kortgrundlag med en middelfejl på under 6 cm på Z-koten, hvilket er mere end rigeligt til formålet. X,Y koordinatdelen er omend endnu bedre. Det vil klart være en fordel at have meget præcise rumlige vejdata til rådighed i projektet, og hvilket et evt. kommende ph.d. projekt vil kunne kaste lys over. Disse data eksisterer ikke i dag. Vejdirektoratet råder ikke over præcise geometriske data for vejene og dets elementer, hvorfor projektet derfor også ville kunne gavne i et bredere perspektiv i vejsektoren.

Forprojektet har givet en klar indikation af, at vi er på rette vej, og der virkelig er meget at spare ved en korrekt fartgivning af et køretøj. Der findes mange mere eller mindre seriøse bud på, hvor og hvordan man kan spare brændstof, men langt de fleste er kun meget vanskelige at opnå og gælder kun under særlige omstændigheder. Herudover er langt de fleste relateret til selve udformningen af køretøjet og udstyret i køretøjet, hvilket ingen indflydelse har på den besparelse, vi kan opnå.

En videreførelse af projektet er således en oplagt mulighed, vi har i Danmark for at vise vejen frem på området. Hittidige forsøg har primært haft salg af et produkt, som den primære motivationsfaktor, hvor målet om at reducere CO₂ udledningen generelt kræver en anden og mere åben tilgang til problemstillingen, omend denne også indebærer en del udfordringer, som vist her i rapporten.

11 Referencer

- Ahn, K., Rakha, H. A., & Moran, K. (2011). Eco-Cruise Control: Feasibility and Initial Testing. In Submitted for peer review at the 90th Transportation Research Board Annual Meeting (p. 16).
- Airbus Develops Fuel Management System for the A380 Using Model-Based Design. (2012). Retrieved August 05, 2013, from http://www.mathworks.se/company/user_stories/Airbus-Develops-Fuel-Management-System-for-the-A380-Using-Model-Based-Design.html
- BOSCH. (2007). Automotive Handbook (7th ed.). Plochingen: Robert Bosch GmbH.
- Brigitte, R., & Frederiksen, P. (2011). Quality assessment of the Danish Elevation Model (DK-DEM) (p. 83). Danish Ministry of the Environment. Retrieved from ftp://ftp.kms.dk/download/Technical_Reports/KMS_Technical_Report_12.pdf
- Chang, D. J., & Morlok, E. K. (2005). Vehicle Speed Profiles to Minimize Work and Fuel Consumption. *Journal of Transportation Engineering*, 131(3), 173–182. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:3(173)
- Digitaliseringsstyrelsen. (2012). Aftale om grunddata. Retrieved August 27, 2013, from <http://www.digst.dk/Loesninger-og-infrastruktur/Grunddata/Aftale-om-grunddata>
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E., & Emadi, A. (2004). Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design (Power Electronics and Applications Series) (p. 424). CRC Press. Retrieved from <http://www.amazon.com/Modern-Electric-Hybrid-Fuel-Vehicles/dp/0849331544>
- Energistyrelsen. (n.d.). Transportens energiforbrug og CO₂-emissioner. Retrieved from <http://www.ens.dk/klima-co2/transport/transportens-energiforbrug-co2-emissioner>
- Evans, L. R., MacIsaac, J. D. J., Harris, J. R., Yates, K., Dudek, W., Jason, H., ... Salaani, M. K. (2009). NHTSA Tire Fuel Efficiency Consumer Information Program Development: Phase 2 – Effects of Tire Rolling Resistance Levels on Traction, Treadwear, and Vehicle Fuel Economy (p. 153). Springfield, Virginia. Retrieved from [http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NVS/Vehicle Research & Test Center \(VRTC\)/ca/Tires/811154.pdf](http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NVS/VehicleResearch%20&%20Test%20Center%20(VRTC)/ca/Tires/811154.pdf)
- Ford Motor Company and Pi Technology Develop Ford Focus Fuel Cell Vehicle Systems with Model-Based Design and Automatically Generated Production Code. (2006). Retrieved August 05, 2013, from http://www.mathworks.se/company/user_stories/Ford-Motor-Company-and-Pi-Technology-Develop-Ford-Focus-Fuel-Cell-Vehicle-Systems-with-Model-Based-Design-and-Automatically-Generated-Production-Code.html?by=industry
- Fröberg, A., Hellström, E., & Nielsen, L. (2006). Explicit fuel optimal speed profiles for heavy trucks on a set of topographic road profiles. *SAE Technical Paper*, 1–1071.
- Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2010). *Traffic and Highway Engineering* (4th ed.). Stamford, USA: Cengage Learning.
- Genta, G. (2006). *Motor Vehicle Dynamics*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

- Geodatastyrelsen. (n.d.-a). Kortforsyningen - download. Retrieved August 27, 2013, from <http://download.kortforsyningen.dk/>
- Geodatastyrelsen. (n.d.-b). Kort10 [landsdækkende] | Kortforsyningen - download. Retrieved August 27, 2013, from <http://download.kortforsyningen.dk/content/kort10-landsdækkende>
- Geodatastyrelsen. (2012, June 28). Hvad er en højdemodel? Geodatastyrelsen. Retrieved August 27, 2013, from <http://www.gst.dk/Emner/Referencenet/dhm/hvaderenhoejdemodel/>
- Geodatastyrelsen. (2013, August 16). Geodatastyrelsen. Geodatastyrelsen. Retrieved from <http://www.gst.dk/>
- Heißing, B., & Ersoy, M. (Eds.). (2011). Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives (p. 591). Springer Vieweg. Retrieved from <http://www.springer.com/springer+vieweg/kraftfahrzeugtechnik/book/978-3-8348-0994-0>
- Hellström, E., Åslund, J., & Nielsen, L. (2010). Design of an efficient algorithm for fuel-optimal look-ahead control. *Control Engineering Practice*, 18(11), 1318–1327. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2009.12.008>
- Hellström, E., Ivarsson, M., Åslund, J., & Nielsen, L. (2009). Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption. *Control Engineering Practice*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066108001251>
- Hethey, J., Kofoed-Wiuff, A., & Lindboe, H. H. (2011). Scenarier for transportsektorens energiforbrug i Danmark (p. 139). Copenhagen. Retrieved from <http://www.ea-energianalyse.dk>
- Hooker, J. N. (1988). Optimal driving for single-vehicle fuel economy. *Transportation Research Part A: General*, 22(3), 183–201. doi:10.1016/0191-2607(88)90036-2
- Iveco Develops a Shift Range Inhibitor System for Mechanical 9- and 16-Speed Transmissions in Six Weeks. (2012). Retrieved August 05, 2013, from http://www.mathworks.se/company/user_stories/Iveco-Develops-a-Shift-Range-Inhibitor-System-for-Mechanical-9--and-16-Speed-Transmissions-in-Six-Weeks.html?by=industry
- Meyer, J. (2007). Engine Modeling of an Internal Combustion Engine With Twin Independent Cam Phasing. The Ohio State University. Retrieved from https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/24538/Meyer_Jason_Honors_Undergraduate_Thesis.pdf
- Nielsen, R. B., & Laugesen, M. S. (2013). Energieffektiv hastighedstilpasning ved brug af fartpilot. Aalborg University. Retrieved from [http://projekter.aau.dk/projekter/da/studentthesis/energieffektiv-hastighedstilpasning-ved-brug-af-fartpilot\(65bd99e4-1591-418b-a8d4-4c448ebf7ffe\).html](http://projekter.aau.dk/projekter/da/studentthesis/energieffektiv-hastighedstilpasning-ved-brug-af-fartpilot(65bd99e4-1591-418b-a8d4-4c448ebf7ffe).html)
- Park, S., Rakha, H., & Ahn, K. (2012). Predictive Ecocruise Control System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Retrieved from <http://trb.metapress.com/index/418274Q4P81JP672.pdf>

- Park, S., Rakha, H., Ahn, K., & Moran, K. (2011). Predictive eco-cruise control: Algorithm and potential benefits. ... System (FISTS), 2011 IEEE Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5973639
- Sahlholm, P., & Johansson, K. H. (2010). Road grade estimation for look-ahead vehicle control using multiple measurement runs. Control Engineering Practice. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066109001804>
- Sahlholm, P., & Wanglund, K. (2009). Comparison of Road Grade Estimation Results Based on GPS Position and Velocity Data. 16th ITS World Congress and Exhibition on Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=908441>
- Scania Develops Fuel-Saving Driver Support System for Award-Winning Long-Haulage Trucks. (2011). Retrieved August 05, 2013, from http://www.mathworks.se/company/user_stories/Scania-Develops-Fuel-Saving-Driver-Support-System-for-Award-Winning-Long-Haulage-Trucks.html?by=industry
- Schwarzkopf, A., & Leipnik, R. (1977). Control of highway vehicles for minimum fuel consumption over varying terrain. Transportation Research. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041164777900934>
- Trafikverket. (n.d.). National Vejdatabase Sverige. Retrieved from <http://www.nvdb.se/en/>
- Vegvesen. (n.d.). Nasjonal vegdatabank (NVDB). Retrieved from <http://www.vegvesen.no/Fag/Teknologi/Nasjonal+vegdatabank>

